

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



DIPARTIMENTO DI BIOLOGIA STRUTTURALE E FUNZIONALE

TESI DI DOTTORATO

in

BIOLOGIA APPLICATA

XIX CICLO

**INFIAMMABILITÀ DELLA LETTIERA DI DIVERSE SPECIE VEGETALI
DI AMBIENTE MEDITERRANEO**

COORDINATORE

Ch.ma Prof. ssa AMALIA VIRZO DE SANTO

CANDIDATA

Dott.ssa Maria Petriccione

TUTORE

Ch.ma Prof. ssa FLORA ANGELA RUTIGLIANO

ANNO ACCADEMICO 2005-2006

INDICE

Riassunto	1
Cap. 1 – Introduzione	3
1.1 - Premessa	3
1.2 - Effetto del fuoco sulla vegetazione	4
1.3 - Effetto del fuoco sul suolo	5
1.4 - Effetto del fuoco sulla chimica dell'atmosfera	6
1.5 - Infiammabilità	7
 Cap. 2 - Obiettivo della ricerca	 10
 Cap. 3 - Esperimento preliminare: Analisi dell'infiammabilità della biomassa	 12
3.1 – Premessa	12
3.2 - Materiali e Metodi	12
3.3 - Analisi statistica dei dati	15
3.4 - Risultati e discussione	16
 Cap. 4 - Analisi dell'infiammabilità della lettiera	 21
4.1 -Premessa	21
4.2 -Standardizzazione del metodo di analisi	21
<u>4.2.1 Determinazione della temperatura di accensione</u>	21
<u>4.2.2 – Determinazione delle altre condizioni sperimentali</u>	23
4.3 - Risultati sull'infiammabilità delle lettiere di diverse specie.....	25
 Cap. 5 - Analisi del contenuto in ceneri e degradazione termica.....	 27
5.1 – Premessa.....	28
5.2 - Materiali e metodi.....	28
<u>5.2.1 - Analisi del contenuto in ceneri della lettiera</u>	28
<u>5.2.2.- Analisi della degradazione termica della lettiera</u>	28
<u>5.2.3 - Analisi statistica dei dati</u>	29

5.3 - Risultati e discussione	29
5.3.1 - Contenuto in ceneri della lettiera	29
5.3.2.- Degradazione termica della lettiera	31
Cap. 6 - Analisi multivariata dei dati	34
6.1 – Premessa	34
6.2 - Metodi di analisi	34
6.3 - Risultati e discussione	35
Cap. 7 - Rappresentazione cartografica dei dati di infiammabilità della lettiera	38
7.1 – Premessa	38
7.2 - Area di studio	38
7.3 - Materiali e metodi	38
7.4 - Risultati	39
Cap. 8 – Conclusioni	40
Bibliografia	42

RIASSUNTO

Il fuoco è uno dei fattori ecologici più rilevanti nel bacino del mar Mediterraneo. In tale ambiente esso può avere un'origine naturale, dovuta specialmente a fulmini, in quanto è favorito dall'alternanza di periodi umidi, nei quali si accumula materiale vegetale, e periodi aridi, nei quali questo si asciuga fino a diventare facilmente incendiabile.

Nella regione mediterranea l'incidenza degli incendi è incrementata durante il XX secolo in concomitanza con il cambiamento del clima che è diventato più caldo e arido (Piñol et al., 1998) e si prevede che nei prossimi anni il rischio di incendi aumenterà ulteriormente (Peñuelas et al., 2005). Diventa pertanto fondamentale mettere a punto strategie di previsione di questo fenomeno che consentano di identificare le aree a maggiore rischio sulle quali potenziare le attività di prevenzione e di spegnimento del fuoco. Un parametro utile a questo scopo è l'infiammabilità del materiale vegetale sia vivo (biomassa) che morto (necromassa). Mentre sono stati condotti molti studi sull'infiammabilità della biomassa, mancano studi sulla necromassa, nonostante questa costituisca la maggior parte del combustibile di origine vegetale in ambiente forestale e generalmente il punto di innesco dell'incendio.

Questo studio ha avuto l'obiettivo di valutare l'infiammabilità della lettiera di diverse specie vegetali, al fine di classificare le specie presenti sul territorio in funzione di questa caratteristica, così come è stato fatto da Valette (1990) per la biomassa vegetale.

Nella prima fase del lavoro è stato applicato il metodo dell'infiammabilità della biomassa vegetale a foglie di specie tipiche dell'ambiente mediterraneo al fine di apprendere la procedura standardizzata da Valette. Questo ha permesso di effettuare un primo screening dell'infiammabilità delle foglie di specie presenti sul territorio, utilizzando 4 parametri di infiammabilità (media del tempo di ignizione, media della durata di combustione, frequenza di ignizione e intensità della fiamma). I risultati hanno mostrato che generalmente l'infiammabilità è legata al tipo di pianta, risultando inferiore negli arbusti considerati che negli alberi e generalmente maggiori nelle latifoglie, ad eccezione di *Robinia pseudoacacia*, che nelle conifere.

Nella seconda fase è stata standardizzata la procedura per la determinazione dell'infiammabilità della lettiera ed è stata poi determinata l'infiammabilità della lettiera di specie di ambiente mediterraneo. La standardizzazione del metodo ha richiesto la definizione della temperatura ottimale dello strumento usato per valutare l'infiammabilità (epiradiatore). Su due specie rappresentative della macchia mediterranea, una latifolia, *Quercus pubescens*, e una conifera, *Pinus pinaster*, sono state eseguite misure di infiammabilità a diverse temperature

(200°C, 250°C, 275°C e 300°C), adattando la metodologia utilizzata per le misure sulla biomassa da Valette (1990). I dati ottenuti hanno indicato chiaramente che la temperatura ottimale dell'epiradiatore di 250 °C. Una volta stabilita la temperatura ottimale e definite le altre condizioni sperimentali del metodo per l'analisi dell'infiammabilità della lettiera, le prove sono state effettuate anche su lettieri di altre specie, sia arboree che arbustive, raccolte nelle formazioni forestali della provincia di Caserta e del Parco Nazionale del Vesuvio. I risultati ottenuti hanno consentito di distinguere le lettieri di specie diverse in funzione della loro infiammabilità. In particolare le lettieri di *Quercus pubescens*, *Fraxinus ornus*, *Pinus pinaster* e *Genista aetnensis* sono risultate le più infiammabili tra le specie analizzate. D'altra parte, le lettieri di *Robinia pseudoacacia*, *Ulmus minor*, *Pistacia lentiscus* e *Cistus incanus* hanno mostrato infiammabilità nulla. Le lettieri delle altre specie hanno mostrato infiammabilità intermedia tra i due estremi.

Nella terza fase è stato misurato il contenuto in ceneri della lettiera, quale fattore che potrebbe avere un ruolo importante nel determinare l'infiammabilità della lettiera. I risultati hanno mostrato che il contenuto in ceneri cambia con la lettiera considerata ed è risultato correlato ai parametri di infiammabilità considerati in questo studio.

È stata, inoltre, individuata la curva di degradazione termica delle lettieri di diverse specie (previa polverizzazione), allo scopo di individuarne la temperatura di accensione. La temperatura di massima perdita di peso non è risultata molto diversa tra le diverse lettieri considerate e non ha mostrato una chiara relazione con l'infiammabilità. Pertanto, contrariamente alle attese, tale temperatura non corrisponde alla temperatura di accensione della lettiera in quanto, evidentemente, l'anatomia fogliare, non conservata nel campione, può avere un'importanza rilevante sull'infiammabilità della lettiera.

Nella quarta fase sono stati elaborati simultaneamente, mediante analisi multivariata, i dati relativi ai parametri che descrivono l'infiammabilità della lettiera, allo scopo di classificare le lettieri studiate in base alla loro infiammabilità. Il risultato della Cluster Analysis ha consentito di classificare le lettieri considerate in quattro classi a diversa infiammabilità: nulla (*R. pseudoacacia*, *U. minor*, *P. lentiscus*, *C. incanus*), bassa (*C. salvifolius*), media (*M. communis*, *O. sylvestris*, *Q. ilex*, *P. halepensis*, *C. sempervirens*) e alta (*P. pinaster*, *Q. pubescens*, *F. ornus*, *G. aetnensis*). L'Analisi delle Componenti Principali ha inoltre messo chiaramente in evidenza l'importanza del contenuto in ceneri della lettiera nel determinarne l'infiammabilità.

Infine sono state redatte carte tematiche delle zone a maggiore infiammabilità dello strato arboreo e arbustivo a partire da carte della vegetazione.

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

1.1 - Premessa

Il fuoco è uno dei fattori ecologici più rilevanti nel bacino del mar Mediterraneo. In tale ambiente esso può avere un'origine naturale, dovuta specialmente a fulmini, in quanto è favorito dall'alternanza di periodi umidi, nei quali si accumula materiale vegetale, e periodi aridi, nei quali questo si asciuga fino a diventare facilmente incendiabile. Tuttavia fin dal Neolitico il fuoco è stato utilizzato dall'uomo quale principale strumento per la gestione della vegetazione (Naveh e Dan, 1973; Singh *et al.*, 1981) e dal Neolitico in poi la frequenza degli incendi è aumentata progressivamente e parallelamente alla espansione delle popolazioni umane (Miles, 1993). Attualmente gli incendi costituiscono un'autentica calamità, in quanto colpiscono non solo boschi ed ecosistemi naturali ma spesso anche coltivi ed insediamenti antropici, determinando, di frequente, la necessità di evacuazione di centri abitati. In Italia le cause naturali costituiscono solo l'1% degli incendi boschivi, mentre in oltre il 70% dei casi gli incendi sono causati dall'uomo volontariamente o involontariamente, secondo i dati del Corpo Forestale dello Stato, relativi al periodo 1998-2003 (Fig. 1.1).

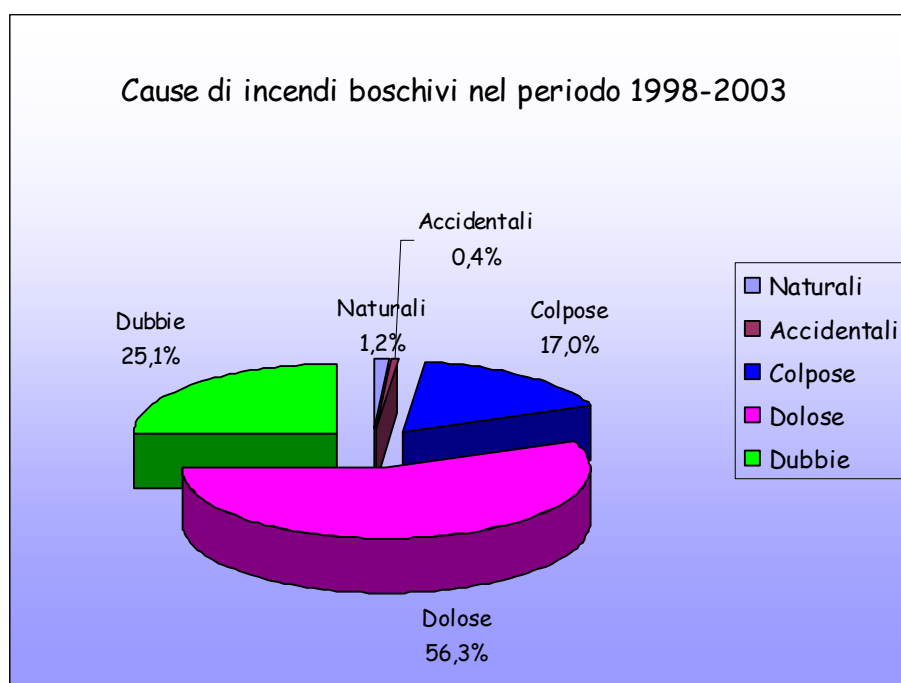


Fig. 1.1 – Cause di incendi in Italia nel periodo 1998-2003 (<http://sviluppo2.corpoforestaledellostato.it>).

Il problema degli incendi boschivi non rappresenta certo un fenomeno recente, ma nell'ultimo trentennio ha assunto proporzioni e ritmi preoccupanti, probabilmente legati all'abbandono di attività economiche che avevano nel bosco il proprio centro di interesse e al conseguente ripristino della vegetazione mediterranea, generalmente infiammabile.

Il fenomeno degli incendi nel nostro paese si caratterizza per la sistematica ricorrenza in alcuni comprensori geografici e per la particolare concentrazione nel periodo estivo, soprattutto nei mesi di luglio e agosto, con un secondo periodo critico di minore gravità nel trimestre invernale per le regioni a clima temperato del nostro Paese (Blasi et al., 2004). Tale distribuzione è correlata ad aspetti climatici e in particolare ad accentuate condizioni di aridità, che persistono prevalentemente durante l'estate, nell'area mediterranea, e alla fine dell'inverno nelle regioni settentrionali.

In termini di distribuzione territoriale, il fenomeno appare singolarmente concentrato nelle regioni meridionali ed insulari: pur detenendo soltanto il 30% della superficie boscata complessiva, tale circoscrizione geografica, in taluni anni, ha registrato oltre il 75% degli incendi e oltre l'80% delle superfici percorse dal fuoco (dati del Corpo Forestale dello Stato, <http://www.corpoforestaledellostato.it>).

Un altro aspetto rilevante riguarda la proporzione di area boscata interessata dal fuoco nel nostro Paese, rispetto a quella non boscata, che cambia nelle due stagioni degli incendi. In particolare, nella stagione estiva (che interessa soprattutto le regioni meridionali ed insulari a clima mediterraneo) tra le superfici percorse dal fuoco prevalgono quelle non boscate, a differenza che nella stagione invernale (che interessa soprattutto le regioni a clima temperato) in cui accade il contrario. Questo è legato al fatto che nelle regioni meridionali il fenomeno degli incendi si verifica sempre più spesso anche negli spazi rurali (Blasi et al., 2004).

Per definire la situazione italiana bastano poche cifre: nel periodo 1970-2001 si sono registrati 307.738 incendi con una media annua di 9.616 eventi; 3.717.174 ha di superficie totale percorsa dal fuoco (di cui 1.686.539 di superfici boscate e 2.030.605 di superfici non boscate), con una media annua di 116.161 ha (dati del Corpo Forestale dello Stato, <http://www.corpoforestaledellostato.it>).

1.2. - Effetto del fuoco sulla vegetazione

Il fuoco influenza la vegetazione a livello di struttura, composizione e produttività (Blasi et al., 2004). Cambiamenti nella composizione in specie e nella struttura della comunità vegetale

sono stati riportati dopo il passaggio del fuoco in diversi arbusteti ed ecosistemi con pini della Francia (Trabaud e Lepart, 1980), Spagna (Faraco et al., 1993), Portogallo (Espirito-Santo et al., 1993) e in Italia (Mazzoleni et al., 1993; Esposito et al., 1999).

Maggiore è la frequenza degli incendi in una formazione forestale più semplice è la sua struttura (Le Houerau, 1974); in zone soggette a incendi periodici si assiste a variazioni nella struttura delle comunità forestali, con una tipica configurazione a mosaico dovuta ad incendi che interessano aree diverse in tempi diversi; ciò comporta una variazione nella copertura delle singole specie e una crescente complessità nella stratificazione (Trabaud, 1987). In aree in cui la frequenza è elevata sono presenti solo specie arbustive ed erbacee; le aree più degradate, per il frequente passaggio del fuoco, presentano solo specie erbacee.

Il fuoco ha effetto anche sulla diversità della comunità vegetale. Generalmente nelle attuali formazioni mediterranee, costituite da piante adattate a questo disturbo ricorrente, il numero delle specie aumenta nelle fasi successive ad un incendio, per effetto del marcato incremento di specie annuali, che persistono finché le piante legnose non ricolonizzano completamente l'area, quando ciò avviene spesso la diversità ritorna ai livelli precedenti l'incendio (Mazzoleni, 1993). Un bosco evoluto è molto più sensibile al fuoco e si ricostituisce in tempi molto più lunghi, specialmente quando l'incendio determina processi erosivi che depauperano il suolo di sostanza organica. Incendi frequenti in aree poco resilienti possono determinare riduzioni di diversità vegetale

La produttività della vegetazione decresce inversamente con la frequenza del fuoco per due ragioni: la vegetazione pirofitica, che ha bisogno del fuoco per la riproduzione, è potenzialmente meno produttiva di quella non pirofitica e l'erosione del suolo a seguito dei frequenti incendi diminuisce la disponibilità di acqua e la fertilità e di conseguenza la produttività (Le Houerau, 1974).

Il fuoco ha l'effetto di stimolare la crescita e la fioritura di alcune specie di piante arboree ed erbacee (Old, 1969; Rowley, 1970); tale fenomeno è comunemente attribuito alle elevate temperature del suolo che si raggiungono nelle aree incendiate rispetto i siti non incendiati (Old, 1969; Peet et al., 1975).

1.3 - Effetto del fuoco sul suolo

Gli incendi forestali agiscono sul suolo causando alterazioni delle caratteristiche chimiche, fisiche e biologiche. Normalmente le temperature raggiunte nel suolo durante un

incendio non sono così elevate; in generale gli effetti diretti del calore intenso sono confinati ai primi 2-3 cm del suolo (De Bano, 1979). Tuttavia nel caso di incendi molto violenti o ricorrenti i loro effetti possono arrivare fino a 10-20 cm di profondità, con conseguenze sulla chimica e la sterilità del suolo, mentre parametri fisici, quale la tessitura, difficilmente variano.

Una prima conseguenza del fuoco sul suolo è la perdita di sostanza organica, che porta a variazioni strutturali del suolo. Inoltre i cambiamenti delle caratteristiche chimiche alterano le proprietà idrologiche di alcuni suoli, poiché l'accumulo di sostanze organiche idrofobiche nella parte più superficiale del suolo può renderlo impermeabile all'acqua (De Bano et al. 1979).

Gli incendi causano perdita di nutrienti, in quanto i composti organici che contengono N e S si ossidano facilmente durante un incendio e tale perdita è direttamente proporzionale alla perdita di sostanza organica (Raisen et al., 1985).

A temperature elevate i nutrienti, mineralizzati dal fuoco, favoriscono la crescita delle piante, mentre diminuisce la capacità di scambio cationico e può variare il pH, che può aumentare anche di due unità (da 6 a 8). Tuttavia la materia organica si riforma dopo pochi anni grazie all'attività metabolica dei microrganismi e delle piante (Giovannini et al., 1990).

L'influenza del fuoco sui processi biologici del suolo si manifesta soprattutto a livello dell'attività microbica; la produzione di ceneri accelera il ciclo dei nutrienti dal suolo alla pianta e aumenta la fissazione dell'azoto. L'aumento di temperatura causato da un violento incendio può eliminare alcuni funghi, protozoi e batteri. Incendi poco violenti, tipici di ambienti a macchia mediterranea, possono risultare addirittura positivi per i batteri, mentre i funghi ne risultano comunque danneggiati, sia in termini di biomassa (Rutigliano et al., 2002) che di diversità tassonomica (Persiani et al., 2002), con conseguente alterazioni nella composizione dell'intera comunità microbica, che tuttavia comportano cambiamenti nella diversità funzionale della comunità microbica solo per pochi giorni (D'Ascoli et al., 2005). Dopo il passaggio del fuoco la ricolonizzazione delle aree incendiate da parte delle comunità microbiche avviene in maniera non uniforme, con una maggiore attività ai margini della superficie incendiata per la maggiore disponibilità di nutrienti.

1.4 - Effetto del fuoco sulla chimica dell'atmosfera

Gli incendi della biomassa determinano emissioni di gas e particolato nell'atmosfera; è importante sottolineare che la combustione negli incendi forestali, anche nelle migliori circostanze, non è un processo chimico efficiente, poiché l'umidità rilasciata dal combustibile

tende ad assorbire una parte dell'energia calorifera del fuoco, diminuendo così la temperatura di combustione. Un'altra ragione sta nel fatto che gli spostamenti d'aria che si verificano durante l'incendio e nel suo intorno non apportano abbastanza ossigeno alla zona di combustione per miscelarsi efficientemente con tutti i gas infiammabili prodotti. Il movimento d'aria, inoltre, trasporta gas parzialmente ossidati lontano dalle zone ad elevata temperatura, rilasciando prodotti di combustione incompleta nell'atmosfera (McMahon, 1983). Di conseguenza, sebbene le emissioni dovute alla combustione della biomassa consistono in prevalenza in CO₂, durante gli incendi vengono rilasciati molti altri composti che giocano un ruolo importante nella chimica dell'atmosfera e nel clima, ad esempio CO, H₂ e CH₄, che contribuisce all'effetto serra (Andreae, 1996), aldeidi, chetoni, acidi organici e composti contenenti N e S (NO_x, N₂O, NH₃, SO₂). Il fuoco, inoltre, produce particolato, costituito da materia organica, fuliggine, e materia inorganica come KCO₃ e SiO₂ (Crutzen e Andreae, 1990), che può agire come nucleo di condensazione delle nubi, influenzando il ciclo della pioggia nelle zone tropicali con potenziali conseguenze sul clima e sul ciclo idrologico (Crutzen e Andreae, 1990). Il fuoco può anche determinare un aumento della produzione di acidi organici volatili da parte della vegetazione che sopravvive al fuoco (Yokelson et al., 1999; Andrete e Merlet, 2001). Tali emissioni biogeniche possono contribuire alle reazioni fotochimiche che avvengono nella troposfera e quindi allo smog fotochimico (Crutzen e Andreae, 1990)

Altri effetti significativi del fuoco sono quelli che esso esercita sui cicli biogeochimici, con perdita di nutrienti essenziali quali P, S, N e K nelle aree tropicali (Goldammer e Crutzen, 1993), così come l'acidificazione delle piogge dovuta ad emissioni di acidi acetico e formico nell'atmosfera (Talbot et al., 1998).

1.5 - Infiammabilità del materiale vegetale

Dal momento che il fuoco si è gradualmente trasformato da fattore ecologico naturale in un fattore ad elevato impatto, responsabile del declino della qualità ambientale delle zone boschive, è di grande importanza, per la prevenzione di questo fenomeno, valutare quali siano i fattori che lo favoriscono. La conoscenza dell'infiammabilità del materiale vegetale sia vivo che morto e dei fattori che la determinano può fornire utili informazioni per arginare questo fenomeno inquietante, che, peraltro incide negativamente sull'economia dell'area considerata. In senso stretto, l'infiammabilità di una pianta indica quanto facilmente essa brucia (comincia a produrre fiamme), mentre la combustibilità indica la rapidità con cui le fiamme possono

diffondersi all'interno della pianta; in genere, per lo stretto collegamento tra questi due parametri a livello di specie, si considera soprattutto l'infiammabilità come risultante di entrambi i parametri.

L'infiammabilità di una pianta dipende dal tipo e la qualità del tessuto e dal contenuto in acqua in rami, ramoscelli e foglie: ci si aspetta una maggiore infiammabilità in specie che tendono ad avere bassi tenori idrici. Un altro fattore che influenza l'infiammabilità è l'architettura e la struttura della pianta e dei suoi organi: piante con una complessa architettura, ad esempio con ramificazioni estese, conducono maggiormente il calore. Il grado (numero di ordini) di ramificazione è utilizzato come indicatore della complessità dell'architettura della copertura, e varia da 0 (nessun ramo) a 5 (quattro o più ordini di ramificazione).

Particolare attenzione va poi data al rapporto superficie/volume, poiché i ramoscelli più piccoli (a sezione più piccola) e foglie più piccole hanno un alto rapporto superficie/volume (e quindi tendono a perdere acqua più facilmente) e quindi sono maggiormente infiammabili. Inoltre oli vegetali, cere, resine e composti organici volatili, presenti in tutte le piante, contribuiscono fortemente all'infiammabilità.

Infine un fattore importante nel determinare l'infiammabilità è lo spessore dello strato di presenza della lettiera: la quantità di materiale fine (rami, foglie, infiorescenze, corteccia) ancora vicina alla pianta durante la stagione secca è critica, poiché la lettiera tende ad avere un tenore idrico molto basso e quindi aumenta l'infiammabilità della pianta.

L'infiammabilità di alcune specie talvolta può non essere correlata alla combustibilità dell'intera comunità arborea. Questa viene infatti determinata anche dalla quantità di lettiera, dalla struttura e dalla continuità della comunità, dal contenuto di sostanza organica nel suolo e dalle condizioni climatiche, poiché dopo lunghi periodi molto secchi alcune piante possono bruciare indipendentemente dalla loro infiammabilità.

L'infiammabilità può essere misurata direttamente misurando il tempo necessario ad una porzione di pianta (ramo, foglia, corteccia) a produrre una fiamma quando esposta ad una data sorgente di calore posta ad una certa distanza. Tali esperimenti sono ripetuti molte volte e i differenti combustibili sono classificati tenendo conto sia della frequenza di infiammazione sia del tempo di accensione. I tessuti che producono fiamma velocemente nella maggior parte delle prove sono classificati come estremamente infiammabili mentre i tessuti che raramente producono fiamma, o impiegano lungo tempo a produrla sono considerati scarsamente infiammabili. Tali esperimenti sono condotti in laboratori in condizioni controllate (umidità e temperatura) utilizzando una fonte di calore locale (radiator elettrico, epi-radiator) ed una

fiamma viva posta ad una data distanza dal campione, che incendia i composti gassosi prodotti dal campione riscaldato (Trabaud, 1976; Valette, 1990).

CAPITOLO 2

OBIETTIVO DELLA RICERCA

L'elevata frequenza di incendi in area mediterranea determina la distruzione di ampie aree sia boscate che non, con conseguenze negative sia da un punto di vista naturalistico, che sotto il profilo socio-economico. Nella decade 1995-04 il fuoco ha distrutto circa il 2.3% dell'area boscata del bacino del Mediterraneo (FAO, 2005) con un danno stimato dell'ordine di 409106 ha. Nella regione mediterranea l'incidenza degli incendi è incrementata durante il XX secolo in concomitanza con il cambiamento del clima che è diventato più caldo e arido (Piñol et al., 1998). Si prevede che nei prossimi anni il rischio di incendi aumenterà ulteriormente (Peñuelas et al., 2005). Diventa pertanto fondamentale mettere a punto strategie di previsione di questo fenomeno che consentano di identificare le aree a maggiore rischio sulle quali potenziare le attività di prevenzione e di spegnimento del fuoco. Un parametro utile a questo scopo è l'infiammabilità del materiale vegetale sia vivo (biomassa) che morto (necromassa). Molti studi sono stati condotti da anni sia in Francia che in Spagna (Delabraze et al., 1974; Valette J.C., 1990; Nuñez et al., 1996; Nuñez et al., 2004) sull'infiammabilità della biomassa, mancano invece studi sulla necromassa, nonostante questa costituisca la maggior parte del combustibile di origine vegetale in ambiente forestale e generalmente il punto di innesco dell'incendio.

Questo studio ha avuto l'obiettivo di valutare l'infiammabilità della lettiera di diverse specie vegetali, al fine di classificare le specie presenti sul territorio in funzione di questa caratteristica, così come è stato fatto da Valette (1990) per la biomassa vegetale. Dal momento che non è stata ancora stabilita una metodologia di analisi, con questo lavoro, svolto in collaborazione con l'Unité Experimental du Ruscas - Equipe de Prévention des Incendies de Forêt dell'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique, Francia), ci si è proposti di standardizzare il metodo di analisi dell'infiammabilità della lettiera, in particolare della lettiera di foglie, che costituisce circa il 70% della lettiera totale in ambiente forestale (McMahon C.K., 1983). Tale studio è parte integrante del progetto "AIOLI" (Agir contre les Incendies, leur Occurrence et leur Localisation dans les Interfaces), il cui scopo è quello di migliorare la conoscenza del fenomeno degli incendi attraverso lo studio delle cause dello scoppio (Jappiot et al., 2006), la loro modellizzazione e rappresentazione cartografica; in particolare lo studio dell'infiammabilità della lettiera permette di conoscere meglio le caratteristiche della propagazione iniziale del fuoco, elemento importante per lo scoppio di un incendio.

Questo lavoro di tesi si è articolato in diverse fasi:

nella prima fase è stato applicato il metodo dell'infiammabilità della biomassa vegetale a foglie di specie tipiche dell'ambiente mediterraneo al fine di apprendere la procedura standardizzata da Valette (1990; cap. 3)

Nella seconda fase è stata standardizzata la procedura per la determinazione dell'infiammabilità della lettiera ed è stata determinata l'infiammabilità della lettiera di specie di ambiente mediterraneo (cap. 4).

Nella terza fase è stato misurato il contenuto in ceneri della lettiera, quale fattore che potrebbe avere un ruolo importante nel determinare l'infiammabilità della lettiera, ed è stata individuata la curva di degradazione termica della stessa, allo scopo di individuare la temperatura di accensione delle lettiere di diverse specie (cap. 5).

Nella quarta fase sono stati elaborati, mediante analisi multivariata, i dati relativi ai parametri che descrivono l'infiammabilità della lettiera, allo scopo di classificare le lettiere studiate in base alla loro infiammabilità ed è stata stabilita la relazione tra infiammabilità e contenuto in ceneri della lettiera (cap. 6).

Infine sono state redatte carte tematiche delle zone a maggiore infiammabilità dello strato arboreo ed arbustivo a partire da carte della vegetazione (cap. 7).

CAPITOLO 3

ESPERIMENTO PRELIMINARE: ANALISI DELL'INFIAMMABILITÀ DELLA BIOMASSA

3.1 - Premessa

L'incendio del materiale vegetale s'innesca quando questo è esposto a fonti di calore. In un primo momento l'acqua libera (presente negli spazi intercellulari, che circola liberamente attraverso le fibre) e quella legata (presente all'interno delle cellule) vengono liberate e la durata di questa fase endotermica di essiccazione dipende dalla quantità d'acqua da vaporizzare e dunque dal tenore idrico del materiale vegetale. Contemporaneamente vaporizzano anche alcuni oli essenziali, di cui sono ricche numerose specie mediterranee. In una seconda fase, anche questa endotermica, il materiale vegetale secco libera una miscela di gas (vapore acqueo, CO₂, composti organici volatili) che si infiamma in presenza di una fiamma nuda o di un punto caldo.

La quantità di energia necessaria affinché il processo proceda fino a terminare caratterizza l'infiammabilità della materia vegetale. Si può definire l'infiammabilità come la resistenza che il materiale combustibile può opporre al fuoco; maggiore è il valore di infiammabilità, minore è la resistenza del combustibile alla fiamma, più rapido è lo scoppio dell'incendio.

3.2 - Materiali e Metodi

Le misure di infiammabilità sono state eseguite su foglie di specie di ambiente mediterraneo raccolte nel periodo luglio-agosto 2004 in formazioni forestali della Provincia di Caserta e del Parco Nazionale del Vesuvio. In particolare sono state utilizzate 9 specie arboree, di cui 6 latifoglie (*Celtis australis*, *Fraxinus ornus*, *Olea eu. Sylvestris*, *Quercus pubescens*, *Robinia pseudoacacia*, *Ulmus minor*) e 3 conifere (*Cupressus sempervirens*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*), e 4 specie arbustive (*Cistus incanus*, *Myrtus communis*, *Pistacia lentiscus*, *Pistacia terebinthus*).

La metodologia di seguito illustrata per definire l'infiammabilità della biomassa vegetale fa riferimento al lavoro di Valette (1990) sull'infiammabilità di specie forestali mediterranee. Le misure di infiammabilità sono state eseguite utilizzando un epiradiatore (Fig. 3.1); tale strumento è costituito da una serpentina metallica collegata ad un disco di silice pura di 100 mm

di diametro; la potenza è di 500 W e produce una irradiazione costante di $7,5 \text{ W/cm}^2$ e di 3 W/cm^2 a 30 mm dal disco; la temperatura di superficie è di 420°C .

L'insieme del materiale vegetale (biomassa fogliare), raccolto per ogni specie, è stato diviso in cinquanta campioni da 1 g di peso fresco.



Fig. 3.1 - Epiradiatore

I parametri misurati sono stati i seguenti:

Tempo di ignizione (DI): il tempo (in secondi) che intercorre tra la deposizione del campione sul disco dell'epiradiatore e la comparsa della fiamma. Oltre i 60 secondi, il test è dichiarato negativo.

Durata di combustione (DC): il tempo (in secondi) durante il quale la fiamma rimane visibile.

Tali misure, effettuate su 50 repliche, hanno permesso di elaborare i seguenti parametri di sintesi:

- **Media del tempo di ignizione (MDI);**
- **Media della durata di combustione (MDC);**
- **Frequenza di ignizione (FI):** numero di test risultati positivi (su 50 prove);
- **Valori di infiammabilità,** a partire dalla frequenza di ignizione (FI) e dalla media del tempo di ignizione (MDI) in base alla Tab. 1.

L'infiammabilità è progressivamente maggiore da 0 a 5.

Tab. 3.1 - Tabella dei Valori di Infiammabilità (Valette, 1990)

FI MDI	< 25	25-38	39-41	42-44	45-47	48-50
32,5 s 27,5 s 22,5 s 17,5 s 12,5 s	0	0	0	1	1	2
	0	0	1	1	2	2
	0	0	1	2	2	2
	0	1	2	2	3	3
	1	1	2	3	3	4
	1	2	3	3	4	5

MDI = Media del Tempo di Infiammazione (in secondi) ; FI = Frequenza di Infiammazione

0 = scarsamente o per nulla infiammabile; 1= poco infiammabile; 2 = moderatamente infiammabile;
3 = infiammabile; 4 = altamente infiammabile; 5 = estremamente infiammabile.

A parità di valore di infiammabilità un'ulteriore distinzione tra le specie può essere effettuata sulla base della durata di combustione e dell'intensità, laddove l'intensità di combustione per ciascun campione analizzato si basa su una analisi visiva, secondo un range che va da 1 (intensità minima) a 5 (intensità massima), come illustrato in Fig. 3.2.

Per ciascuna specie considerata sono state utilizzate ulteriori tre repliche per valutare il tenore idrico delle foglie mediante metodo gravimetrico, seccando i campioni di foglie a 75°C fino a peso costante. Il tenore idrico, determinato per differenza tra peso fresco e peso secco delle foglie, è stato espresso come percentuale del peso secco.



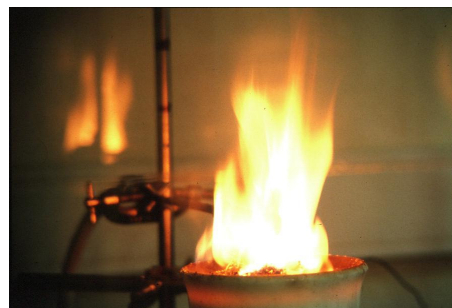
a) Intensità 1 (altezza fiamma 0-1 cm)



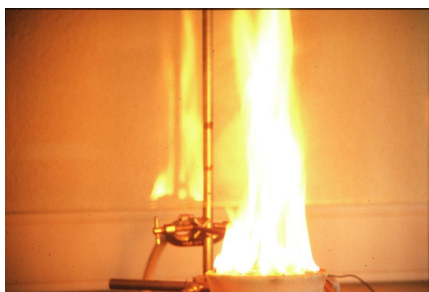
b) Intensità 2 (altezza fiamma 2-3 cm)



c) Intensità 3 (altezza fiamma 4-5 cm)



d) Intensità 4 (altezza fiamma 6-8 cm)



e) Intensità 5 (altezza fiamma > 8 cm)

Fig. 3.2 – Intensità della fiamma valutata in base alla sua altezza rispetto al disco dell'epiradiatore.

3.3 - Analisi statistica dei dati

Per la media del tempo di ignizione e per la media della durata di combustione è stata saggiata la significatività delle differenze tra foglie di specie diverse mediante l'Analisi della Varianza ad una via, seguita dallo Student-Newman-Keuls test ($P < 0.05$). E' stata inoltre saggiata la correlazione tra il tenore idrico delle foglie e i parametri utilizzati per definire l'infiammabilità mediante il coefficiente di Pearson ($P < 0.05$).

3.4 - Risultati e discussione

Gli studi condotti sulla biomassa hanno permesso di effettuare un primo screening dell'infiammabilità delle foglie di specie presenti sul territorio, come riportato in Tab. 3.2 e Tab. 3.3.

Tab. 3.2 – Media del tempo di ignizione (MDI), media della durata di combustione (MDC), frequenza di ignizione (FI), tenore idrico e valori di infiammabilità in specie arboree di ambiente mediterraneo.

	MDI (sec)	MDC (sec)	Frequenza di infiammazione	Tenore idrico (%)	Valori di Infiammabilità
<i>Celtis australis</i>	11.2558	7.37209	43	109.625	3
<i>Cupressus sempervirens</i>	35.1905	7.38095	21	126.525	0
<i>Fraxinus ornus</i>	7.86	10.78	50	126.925	5
<i>Olea eu. sylvestris</i>	15.6667	12.6667	48	105.725	4
<i>Pinus halepensis</i>	20.8	7.25	40	120.675	2
<i>Pinus pinaster</i>	29.1364	11.3182	44	192.3	1
<i>Quercus pubescens</i>	8.32	9.22	50	140.35	5
<i>Robinia pseudoacacia</i>	0	0	0	199.6	0
<i>Ulmus minor</i>	8.86	8.04	50	112.65	5

Tab. 3.3 – Media del tempo di ignizione (MDI), media della durata di combustione (MDC), frequenza di ignizione (FI), tenore idrico e valori di infiammabilità in specie arbustive di ambiente mediterraneo.

	MDI (sec)	MDC (sec)	Frequenza di infiammazione	Tenore idrico (%)	Valori di Infiammabilità
<i>Cistus incanus</i>	22.8889	10	9	88.525	1
<i>Myrtus communis</i>	12.125	5.125	8	75.75	1
<i>Pistacia lentiscus</i>	14.0625	6.25	16	101.1	1
<i>Pistacia terebinthus</i>	13.45	5.1	20	136.375	1

I risultati mostrano che generalmente l'infiammabilità è legata al tipo di pianta (Tab. 3.2, 3.3, Fig. 3.3).

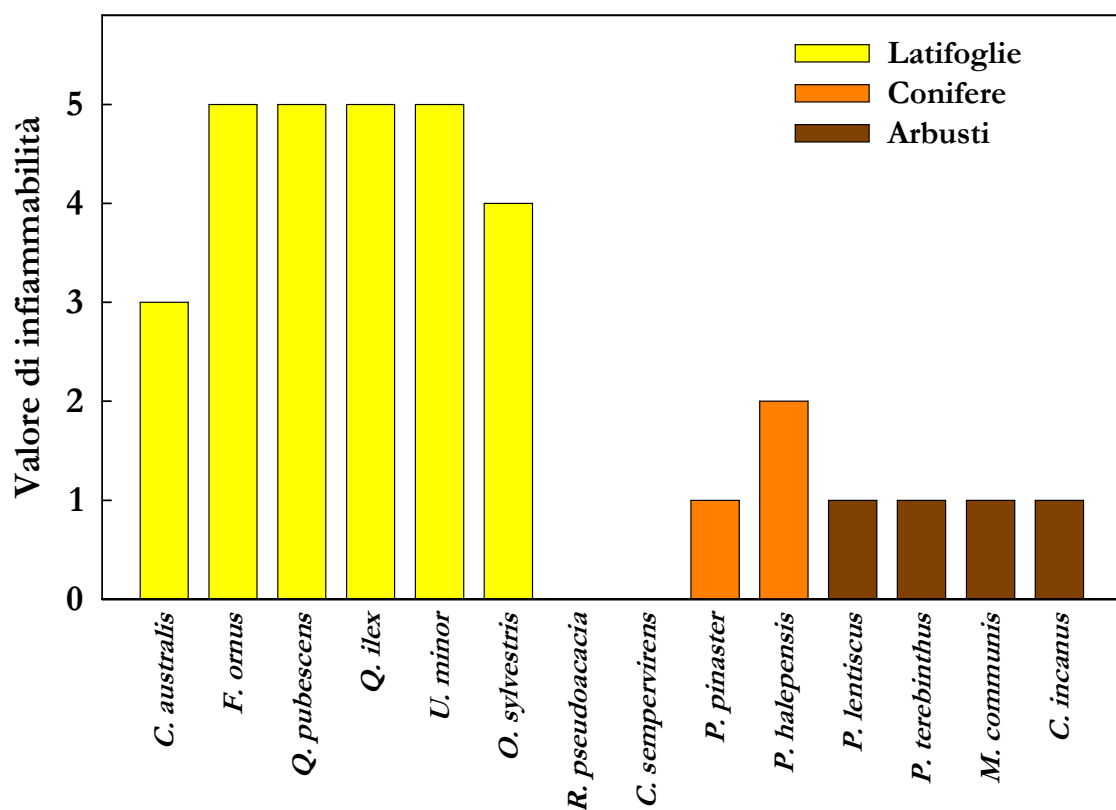


Fig. 3.3 – Valori di infiammabilità della biomassa analizzata

Tutti gli arbusti presentano una bassa infiammabilità, mentre le latifoglie sono risultate da infiammabili ad estremamente infiammabili, ad eccezione di *Robinia pseudoacacia* il cui test di infiammabilità è risultato negativo per tutte le prove effettuate. Le conifere hanno presentato una infiammabilità da bassa a moderata. Analogamente le medie dei tempi di ignizione (MDI; Fig. 3.4) e di durata di combustione (MDC; Fig. 3.5) differiscono tra i diversi tipi di pianta.

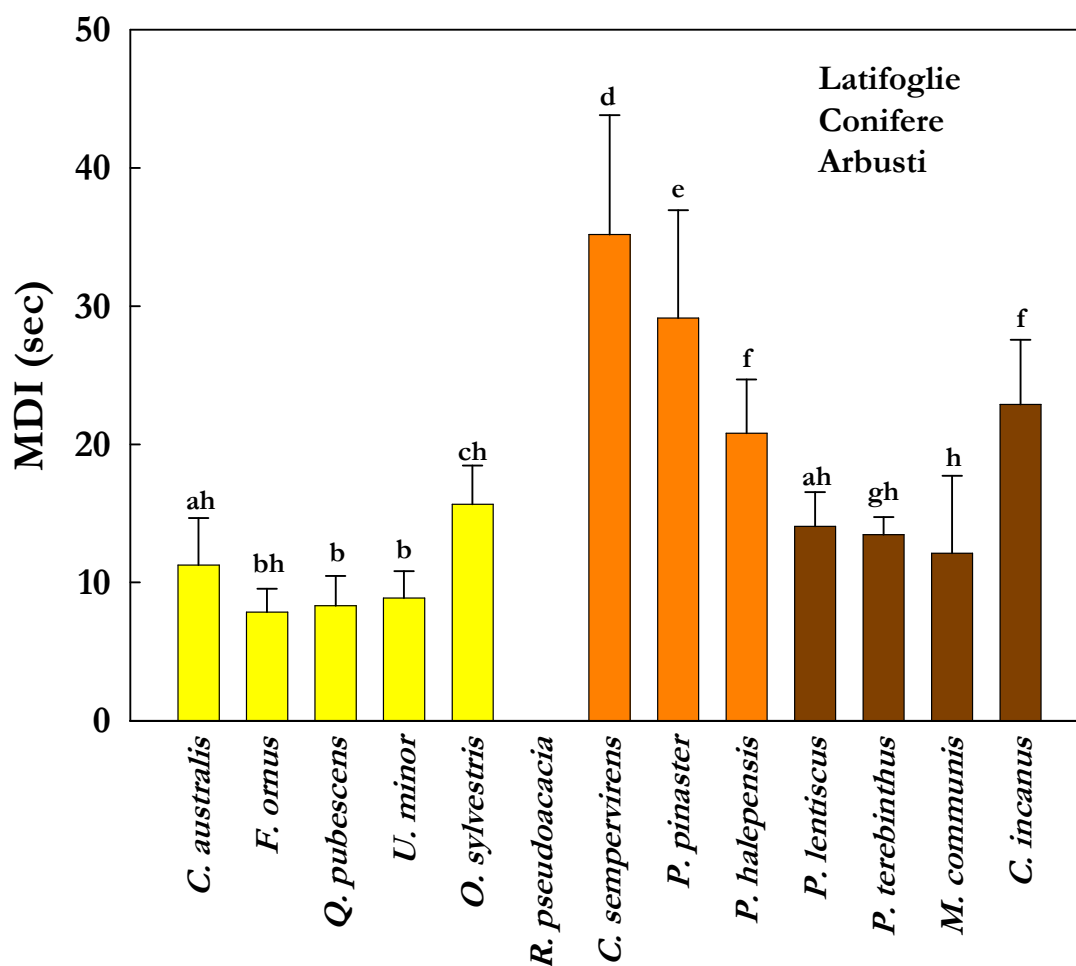


Fig. 3.4 - Valori medi (+ Deviazione Standard) del tempo di ignizione (MDI) della biomassa analizzata

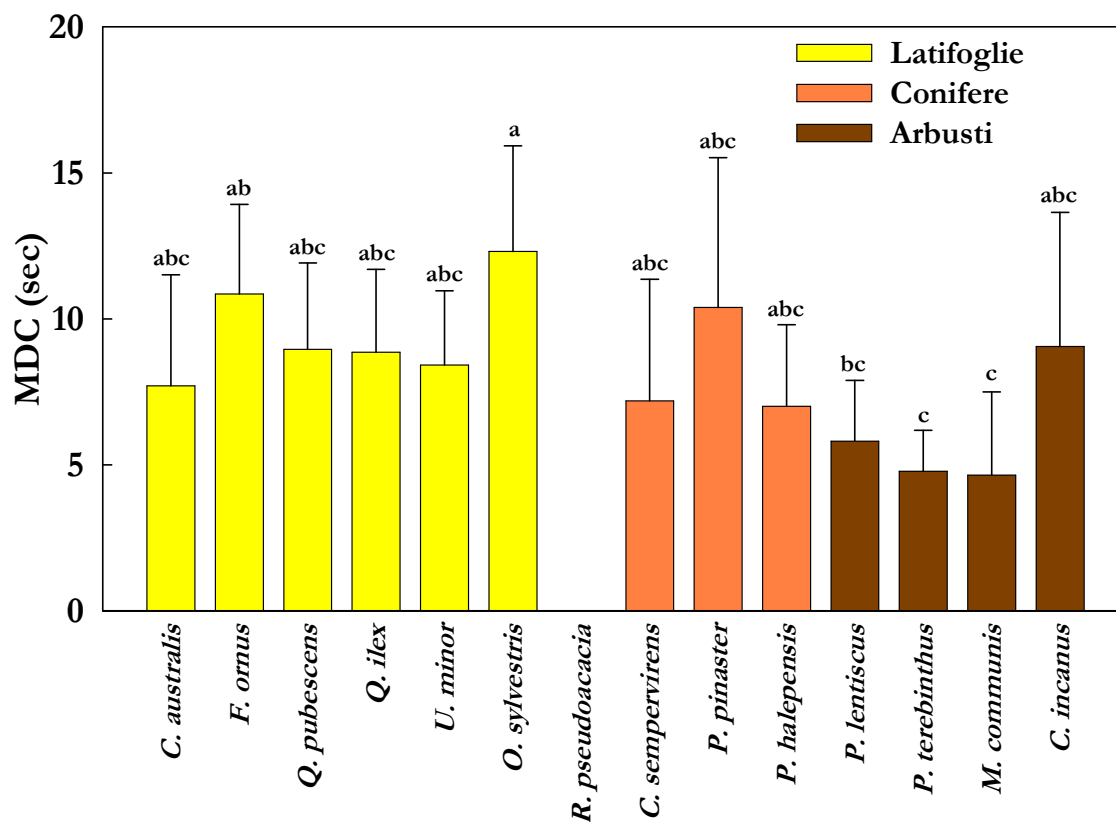


Fig. 3.5 – Valori medi (+ Deviazione Standard) della durata di combustione (MDC) della biomassa analizzata

I valori del tenore idrico (%) delle specie variano da un minimo di 75 % (*Myrtus communis*), ad un massimo di 199.6 % (*Robinia pseudoacacia*). Da questi primi dati non è risultata alcuna correlazione del tenore idrico né con la media del tempo di ignizione (MDI; Fig. 3.6), né con la media della durata di combustione (MDC; Fig. 3.7), nè con l'inflammabilità (Fig. 3.8).

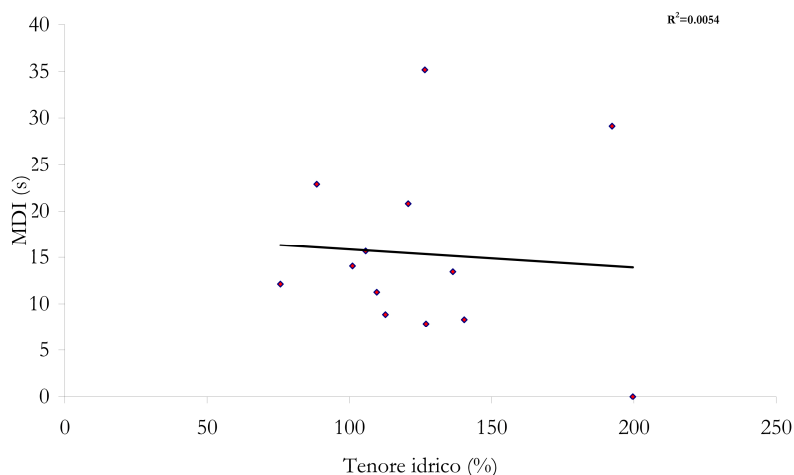


Fig. 3.6 – Correlazione tra tenore idrico e media del tempo di ignizione (MDI)

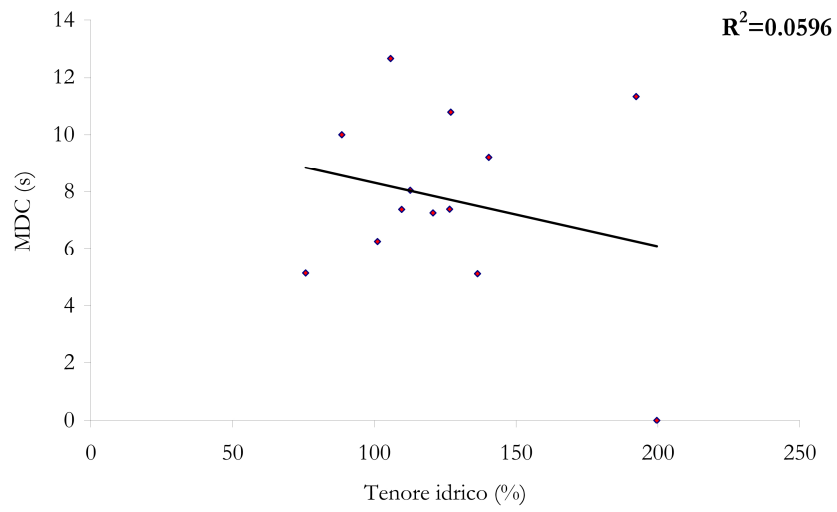


Fig. 3.7 – Correlazione tra tenore idrico e media della durata di combustione (MDC)

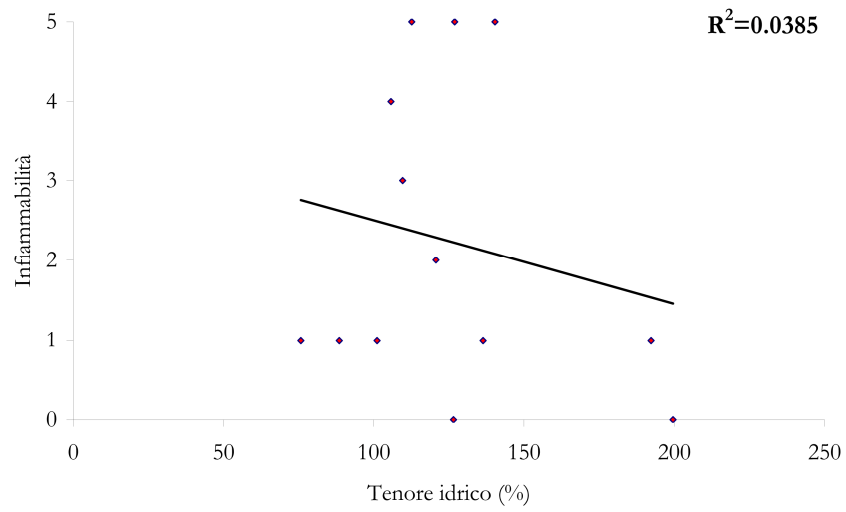


Fig. 3.8 – Correlazione tra tenore idrico e infiammabilità

CAPITOLO 4

ANALISI DELL'INFIAMMABILITÀ DELLA LETTIERA

4.1 - Premessa

Nell'ambito delle ricerche sugli incendi forestali e della loro modellizzazione, non è stata ancora rivolta molta attenzione allo studio dell'infiammabilità della lettiera, nonostante questa rappresenti la maggior arte del combustibile vegetale in ambiente forestale, e quindi non è stata ancora standardizzata una metodologia di analisi a differenza della la biomassa vegetale (Valette, 1990).

I pochi studi disponibili sulla combustibilità della lettiera di foglie (Buresti et al., 1976), realizzati al fine di stabilire una relazione tra stato idrico del combustibile e la sua reazione al fuoco, sono stati condotti utilizzando porzioni di lettiera (dischi di 15 mm di diametro) con diversi stati di idratazione ed è stato calcolato il tempo di ignizione bruciando i campioni su un epiradiatore alla temperatura di 360°C. Lo studio ha messo in evidenza una riduzione progressiva del tempo di ignizione al decrescere del tenore idrico della lettiera.

Lo stato di umidità della lettiera, quindi, è il parametro su cui si è concentrata maggiormente l'attenzione negli ultimi anni, in quanto condiziona la possibilità di innesco del del fuoco e di propagazione della fiamma (Ciampelli et al., 1990).

Al contrario, nel presente lavoro, si è deciso di valutare l'infiammabilità della lettiera di foglie indipendentemente da altri fattori che potessero influenzarne l'ignizione o la combustione, in modo da ottenere un indice assoluto per il calcolo del rischio incendi.

Per questo motivo si è deciso di utilizzare lettiera di foglie seccata all'aria per una settimana, in modo da avere lettieri con tenore idrico omogeneo che non influenzasse le prove di combustione.

4.2 - Standardizzazione del metodo di analisi

4.2.1 Determinazione della temperatura di ignizione

Il primo passo effettuato per l'analisi dell'infiammabilità della lettiera è stato quello di determinare la temperatura ottimale dell'epiradiatore. Questa deve essere sufficientemente alta da determinare la combustione del materiale vegetale, ma non eccessivamente alta per evitare

una combustione troppo rapida per tutte le lettiere che non consente di discriminare tra lettiere di specie diverse.

Le misure di infiammabilità sono state eseguite nel maggio 2004 presso il Centro di ricerca sugli incendi forestali dell'INRA di Bormes les Mimosas (Francia), su due specie rappresentative della macchia mediterranea, una latifolia, *Quercus pubescens*, e una conifera, *Pinus pinaster*, raccolte in foreste del distretto del Ruscas.

Il materiale vegetale raccolto è stato lasciato seccare all'aria per una settimana; successivamente è stato diviso in 25 campioni da 1 g di peso.

Sono state eseguite prove di infiammabilità a diverse temperature, 200°C, 250°C, 275°C e 300°C, adattando la metodologia utilizzata per le misure sulla biomassa (vedi paragrafo 3.2); ciò è stato possibile collegando un partitore di tensione all'epiradiatore, che ha permesso di regolarne il voltaggio e quindi la temperatura alla superficie. I due parametri considerati sono stati la media del tempo di ignizione e la frequenza di ignizione.

I risultati delle prove effettuate hanno permesso di valutare in maniera abbastanza chiara quale fosse la temperatura ideale per le prove di infiammabilità, come mostrato in tabella 4.1.

Tab. 4.1 – Frequenza di ignizione (FI) e Media del tempo di ignizione (MDI) in *P. pinaster* e *Q. pubescens*, utilizzando diverse temperature delle epiradiatore

Specie	Temperatura dell'epiradiatore (° C)	FI	MDI (secondi)
<i>P. pinaster</i>	200	0	
	250	23	20,26
	275	25	10,64
	300	25	8,6
<i>Q. pubescens</i>	200	0	
	250	16	13,18
	275	25	9,6
	300	25	5,4

Alla prima temperatura considerata, 200 ° C, i test sono risultati negativi per entrambe le specie, poiché nessun campione ha preso fuoco (frequenza di ignizione = 0), pertanto tale temperatura è troppo bassa e non sufficiente per la combustione.

La seconda temperatura considerata, 250 °C, ha mostrato risultati positivi per entrambe le specie considerate; in particolare *P. pinaster* ha presentato, rispetto a *Q. pubescens*, valori più elevati di frequenza di ignizione e di media del tempo di ignizione (Tab. 4.1).

Alle due successive temperature considerate, 275 e 300 ° C, i test sono risultati positivi per entrambe le specie, che hanno mostrato la stessa frequenza di ignizione (25). La media del tempo di ignizione è risultata molto simile in *P. pinaster* e in *Q. pubescens* (rispettivamente, 10,64 s e 9,6 s) a 275 ° C, e maggiore in *Pinus pinaster* (8,6 s) che in *Quercus pubescens* (5,4 s) a 300 ° C. In entrambe le specie l'incremento della temperatura dell'epiradiatore ha determinato un incremento della frequenza di ignizione ed una riduzione della media del tempo di ignizione (Tab. 4.1).

I dati suggeriscono di utilizzare la temperatura dell'epiradiatore di 250 °C, in quanto è la temperatura più bassa alla quale il materiale vegetale prende fuoco e permette, inoltre, di distinguere tra loro le lettiera di diverse specie, al contrario delle altre due temperature (275 e 300), che determinano una combustione troppo rapida del materiale vegetale (tempo di ignizione più basso).

4.2.2 – Determinazione delle altre condizioni sperimentali

Una volta stabilita la temperatura ottimale per le prove di infiammabilità della lettiera, le analisi sono state effettuate anche su lettiera di altre specie, sia arboree che arbustive, raccolta nelle formazioni forestali presenti nella provincia di Caserta e nel Parco Nazionale del Vesuvio.

Sono state effettuate due campagne di campionamento, la prima nel periodo maggio-giugno, la seconda nel periodo luglio-agosto 2005; le specie raccolte nel periodo maggio-giugno (*Cupressus sempervirens*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Robinia pseudoacacia*, *Quercus pubescens*, *Ulmus minor*, *Olea eu. sylvestris*, *Fraxinus ornus*) sono state analizzate eseguendo, per ogni specie, 25 prove su campioni da 1 g. Durante la seconda campagna di campionamento sono state aggiunte altre specie a quelle della prima campagna (*Quercus ilex*, *Genista aetnensis*, *Myrtus communis*, *Pistacia lentiscus*, *Cistus salvifolius*, *Cistus incanus*); in questo caso sono state eseguite per ogni specie, 50 prove su campioni da 1 g e si è deciso di attendere due minuti tra una prova e l'altra, in modo da favorire il ritorno della temperatura a 250 °C dopo ciascuna prova.

Come per la biomassa vegetale, i parametri misurati sono stati il **Tempo di ignizione (DI)**, tempo che intercorre tra la deposizione del campione sul disco dell'epiradiatore e la comparsa della fiamma. Oltre i 60 secondi, il test è dichiarato negativo) e la **Durata di combustione (DC)**, tempo durante il quale la fiamma rimane visibile). Tali misure permettono di elaborare i seguenti parametri di sintesi: **Media del tempo di ignizione (MDI)** e la **Media della Durata di Combustione (MDC)**.

E' stata inoltre calcolata la **Frequenza di ignizione** (numero di test risultati positivi su 50 prove) ed è stata determinata l'intensità della fiamma come mostrato in Fig. 3.2.

Dalle misure effettuate sui campioni raccolti nella prima campagna non è emersa una chiara distinzione tra le lettiere di specie diverse, tranne quelle di *Robinia pseudoacacia* e *Ulmus minor* i cui test sono risultati tutti negativi, poiché il tempo di ignizione era molto basso (tra i 10 e i 15 secondi) e tendeva progressivamente a diminuire con il procedere dell'esperimento (Fig. 4.1). Tale risultato era dovuto all'innalzamento della temperatura dell'epiradiatore dopo ciascuna prova (la temperatura saliva oltre i 350 °C). Pertanto nella seconda campagna di misure si è lasciato raffreddare l'epiradiatore tra una prova e la successiva, attendendo 2 minuti. In tal modo sono notevolmente migliorati i tempi di ignizione che si sono mantenuti costanti per tutte le prove (Fig. 4.1). Inoltre poiché probabilmente 25 repliche non risultavano sufficienti a mettere in evidenza eventuali differenze tra lettiere di specie diverse, nella seconda campagna sono state utilizzate 50 repliche per ciascuna specie.

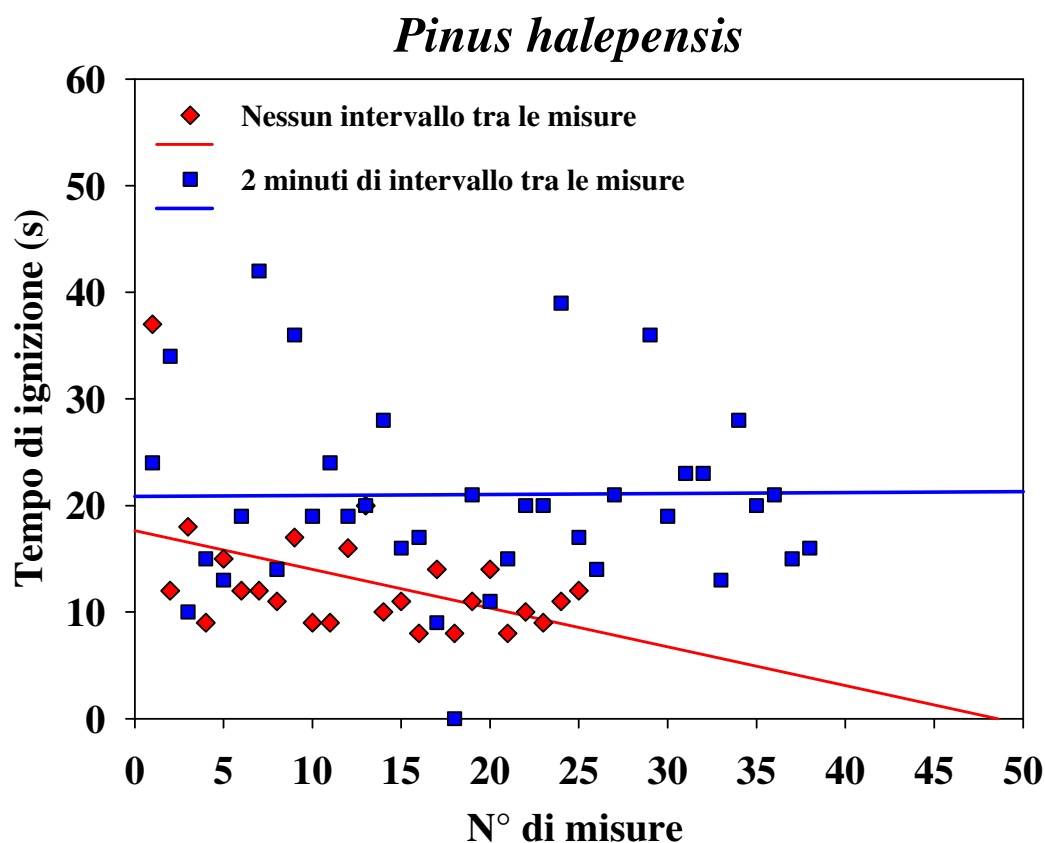


Fig. 4.1 – Misure dei tempi di ignizione

I risultati delle analisi effettuate sulle specie raccolte nel secondo campionamento hanno mostrato, a differenza che nella prima campagna di misure, una chiara distinzione tra lettiera di diverse specie.

Ciò è vero in particolare per le lettiera di *Pinus pinaster*, *Pinus halepensis*, *Fraxinus ornus*, mentre per *Olea sylvestris* il miglioramento è ancora più evidente in quanto i tempi di ignizione sono più alti rispetto la prima prova di infiammabilità.

Queste misure hanno consentito di standardizzare il metodo per la lettiera con le seguenti condizioni sperimentali:

- 1) Temperatura dell'epiradiatore 250 °C;
- 2) Numero di prove per ogni specie: 50;
- 3) Peso del campione: 1 g;
- 4) Intervallo tra due misure: 2 minuti.

4.3 - Risultati sull'infiammabilità delle lettiera di diverse specie

I risultati ottenuti nella seconda campagna di campionamento hanno consentito di distinguere le lettiera di specie diverse in funzione della loro infiammabilità. In particolare le lettiera di *Quercus pubescens*, *Fraxinus ornus*, *Pinus pinaster* e *Genista aetnensis* sono risultate le più infiammabili tra le specie analizzate; infatti le lettiera di *Quercus pubescens* e *Fraxinus ornus* hanno mostrato il valore più basso del tempo di ignizione ed un'alta frequenza di ignizione; *Pinus pinaster* e *Genista aetnensis* hanno mostrato la più alta frequenza di ignizione e un tempo di ignizione relativamente basso. Inoltre la lettiera di *Pinus pinaster* ha il valore più alto di durata di combustione, mentre *Quercus pubescens*, *Fraxinus ornus* e *Genista aetnensis* hanno mostrato i valori più alti di intensità di fiamma (Fig. 4.2).

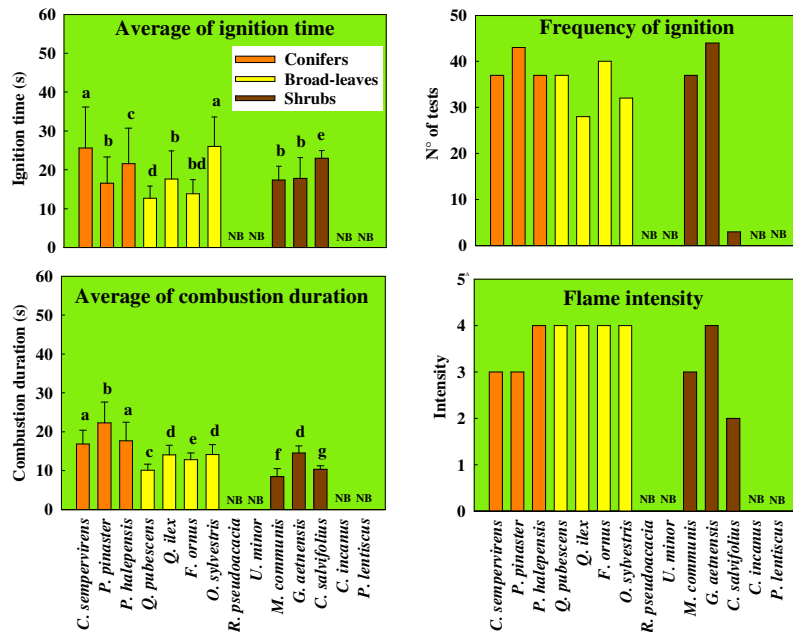


Fig. 4.2 – Misure dei parametri di infiammabilità delle lettiera analizzate

D'altra parte, le lettiera di *Robinia pseudoacacia*, *Ulmus minor*, *Pistacia lentiscus* e *Cistus incanus* hanno mostrato infiammabilità nulla. Le lettiera delle altre specie hanno mostrato infiammabilità intermedia tra i due estremi: le lettiera di *Pinus halepensis*, *Cupressus sempervirens* e *Myrtus communis* hanno mostrato un'elevata frequenza di ignizione; le lettiera di *Pinus halepensis* *Myrtus communis* hanno mostrato una media del tempo di ignizione moderata, mentre *Cupressus sempervirens* e *Olea eu. sylvestris* hanno mostrato la più elevata media del tempo di ignizione; *Pinus halepensis* e *Cupressus sempervirens* hanno mostrato un'elevata media della durata di combustione; *Pinus halepensis* inoltre ha mostrato la più alta frequenza di ignizione.

Rispetto alla lettiera di *Olea eu. sylvestris*, *Pinus halepensis* e *Cupressus sempervirens*, *Myrtus communis* ha mostrato il valore più basso del tempo di ignizione, ma anche il valore più basso della durata di combustione. *Quercus ilex* ha presentato un tempo di ignizione e una frequenza di ignizione media, ma il più alto valore di intensità della fiamma e la più alta durata di combustione; *Olea eu. sylvestris*, pur mostrando la più alta media del tempo di ignizione, ha una elevata frequenza di ignizione e durata di combustione così come il valore più elevato di intensità di fiamma. Infine, *Cistus salviifolius* ha mostrato una frequenza di ignizione molto bassa, bassa durata di combustione, un elevato tempo di ignizione e il valore più basso di intensità di fiamma.

CAPITOLO 5

ANALISI DEL CONTENUTO IN CENERI E DEGRADAZIONE TERMICA

5.1 - Premessa

La classificazione del combustibile vegetale in funzione della sua infiammabilità è una componente importante nel calcolo degli indici di rischio incendi e per la prevenzione degli stessi (Dimitrakopoulos et al., 2001). Numerosi programmi di ricerca europei, quali Fire Star (www.eufirestar.org) e Fire Lab (www.eufirelab.org) da anni si occupano della caratterizzazione del materiale vegetale forestale attraverso l'analisi di parametri fisici (lunghezza, peso, diametro, massa, volume, rapporto massa/volume e superficie/volume del materiale vegetale), chimici (umidità e contenuto in ceneri) e termici (degradazione termica e potere calorifico del combustibile vegetale) che possono essere in relazione con l'infiammabilità.

Questi parametri determinano la quantità potenziale di energia che un incendio può rilasciare; di conseguenza lo studio di queste caratteristiche in relazione al parametro infiammabilità contribuisce alla previsione dell'intensità e del grado di pericolosità dell'incendio forestale.

In questo lavoro è stata posta l'attenzione su due parametri: il contenuto in ceneri e la degradazione termica della lettiera di foglie.

Per definizione il contenuto in ceneri rappresenta il residuo della combustione del materiale vegetale seccato in stufa ed è la misura del contenuto totale di minerali (Allen, 1989). Tale parametro è stato utilizzato in passato come variabile nella modellizzazione del comportamento del fuoco nello studio degli incendi forestali (Rothemel, 1972) ed è importante poiché influenza la combustibilità delle specie vegetali, in quanto piante con elevato contenuto in ceneri sono risultate più resistenti al fuoco (Loomis, 1982). In particolare lo studio di Loomis, condotto sulla lettiera di diverse specie di conifere e latifoglie di foreste nord-americane, ha messo in evidenza come il contenuto totale in ceneri differisce da specie a specie e varia nel tempo, crescendo in seguito alla caduta delle foglie, sebbene non sempre in maniera significativa.

La degradazione termica del materiale vegetale, operata a diverse temperature, è definita come il decremento del rapporto adimensionale M_t/M_i , dove M_t è la massa del campione alla temperatura t e M_i la massa iniziale a temperatura ambiente (Mendes Lopez et al, 2001). Tale parametro, utilizzato nella modellizzazione del comportamento del fuoco, serve a stabilire una relazione tra la velocità di degradazione del combustibile vegetale rispetto alla temperatura di

combustione; questa informazione può implementare la capacità di previsione dei modelli di comportamento del fuoco per meglio descrivere la fase di combustione.

In questa fase del lavoro si è cercato di verificare l'influenza del contenuto in ceneri sull'infiammabilità della lettiera di foglie e si è misurata la degradazione termica della lettiera per verificarne la correlazione con i parametri di infiammabilità e per individuare la temperatura di accensione.

5.2 - Materiali e Metodi

5.2.1 - Analisi del contenuto in ceneri della lettiera

Le misure sono state eseguite sulle lettiere delle 14 specie (*Cupressus sempervirens*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Robinia pseudoacacia*, *Quercus pubescens*, *Ulmus minor*, *Olea eu. sylvestris*, *Fraxinus ornus*, *Quercus ilex*, *Genista aetnensis*, *Myrtus communis*, *Pistacia lentiscus*, *Cistus salvifolius*, *Cistus incanus*) raccolte nel periodo luglio-agosto 2005.

Le lettiere sono state macinate e messe in stufa per 24 ore alla temperatura di 60°C. Successivamente campioni da 1 g contenuti in capsule di porcellana, precedentemente pesate, sono stati messi in una muffola ed è stata raggiunta la temperatura di 550°C con step successivi di 100°C per evitare la dispersione del campione durante la combustione. I campioni sono stati lasciati in stufa a 550°C per due ore, poi la temperatura è stata riportata a 100°C e una volta raffreddati, i campioni sono stati trasferiti in un essiccatore per evitare la reidratazione durante il raffreddamento.

Una volta raggiunta la temperatura ambiente i campioni sono stati pesati ed è stato calcolato il contenuto in ceneri con la seguente formula:

$$C = \frac{P_c}{P_i} * 100$$

dove P_c è il peso finale del campione, P_i è il peso iniziale.

5.2.2 - Analisi della degradazione termica della lettiera

Le misure sono state eseguite sulle lettiere delle 14 specie (*Cupressus sempervirens*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Robinia pseudoacacia*, *Quercus pubescens*, *Ulmus minor*, *Olea eu. Sylvestris*, *Fraxinus ornus*, *Quercus ilex*, *Genista aetnensis*, *Myrtus communis*, *Pistacia lentiscus*, *Cistus salvifolius*, *Cistus incanus*) raccolte nel periodo luglio-agosto 2005.

Le lettiere sono state macinate e messe in stufa per 24 ore alla temperatura di 60°C. Successivamente campioni da 5 g contenuti in capsule di porcellana, precedentemente pesate, sono stati messi in muffola ed è stata raggiunta la temperatura di 600°C con step successivi (50, 100, 150, 160, 170, 180, 190, 200, 210, 220, 230, 240, 250, 260, 270, 300, 400, 500, 600 °C).

Per ogni step di temperatura raggiunto il campione è stato prelevato, trasferito in un essiccatore, lasciato raffreddare, pesato e messo di nuovo in muffola. Il peso raggiunto al termine di ogni step è stato calcolato come per il contenuto in ceneri.

5.2.3 - Analisi statistica dei dati

Sia per il contenuto in ceneri che per la degradazione termica alle diverse temperature è stata calcolata la media su tre repliche e la relativa deviazione standard. E' stata inoltre saggiata la correlazione del contenuto in ceneri delle foglie e della temperatura di accensione, valutata attraverso il grafico di degradazione termica, con i parametri utilizzati per definire l'infiammabilità mediante il coefficiente di Pearson ($P < 0.05$).

5.3 - Risultati e discussione

5.3.1 - Contenuto in ceneri della lettiera

I risultati hanno mostrato che le lettiere considerate differiscono per il contenuto in ceneri. In particolare, tra le conifere *Cupressus sempervirens* ha mostrato il valore più alto (Tab 5.1) seguito dalle lettiere di *Pinus halepensis* e poi *Pinus pinaster*; tra le latifoglie le specie che hanno presentato i valori più elevati sono *Ulmus minor* e *Robinia pseudoacacia*, mentre i valori più bassi sono relativi a *Quercus pubescens* e *Quercus ilex*; tra gli arbusti i valori maggiori sono stati osservati nelle lettiere di *Cistus incanus* e *Cistus salvifolius*, mentre *Genista aetnensis* ha mostrato il valore più basso.

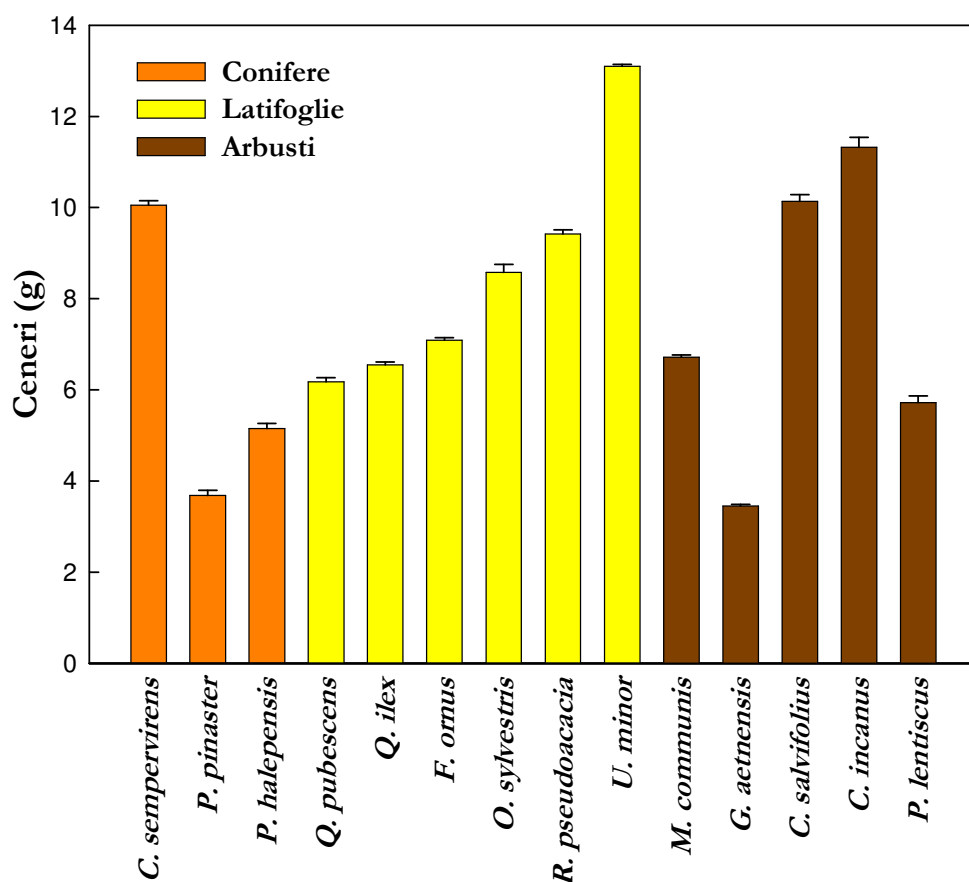


Fig. 5.1 Valori medi (+ Deviazione Standard) del contenuto in ceneri delle lettiera analizzate

I risultati mostrano che il contenuto in ceneri influenza il tempo di ignizione, poiché le specie ad elevato contenuto in ceneri presentano un tempo di ignizione alto, come *Cistus salvifolius* e *Cistus incanus* per gli arbusti, *Ulmus minor* e *Robinia pseudoacacia* per le latifoglie e *Cupressus sempervirens* per le conifere. Al contrario, specie con contenuto in ceneri basso, come *Genista aetnensis* tra gli arbusti, *Quercus pubescens* e *Quercus ilex* tra le latifoglie e *Pinus pinaster* tra le conifere, presentano un'elevata frequenza di ignizione, intensità di fiamma e durata di combustione (Fig. 5.1). Il contenuto in ceneri è infatti risultato positivamente correlato alla media del tempo di ignizione (MDI) e negativamente correlato alla media della durata di combustione (MDC), alla frequenza di ignizione (FI) e all'intensità di fiamma (I; Tab. 5.1)

Tab 5.1 Coefficienti di Pearson calcolati tra il contenuto in ceneri, la prima temperatura di marcata perdita di peso del campione, e i diversi parametri di infiammabilità (n = ...; livello di significatività: *:P<0.05; **:P<0.01; ***:P<0.001).

Ceneri				
MDI	-0,62	0,58			
MDC	0,57	-0,58	-0,86		
FI	0,74	-0,67	-0,87	0,85	
I	0,62	-0,59	-0,94	0,85	0,90
	Tc	Ceneri	MDI	MDC	FI

MDI: Media del tempo di ignizione; MDC: Media della durata di combustione; FI: Frequenza di ignizione; I: Intensità della fiamma

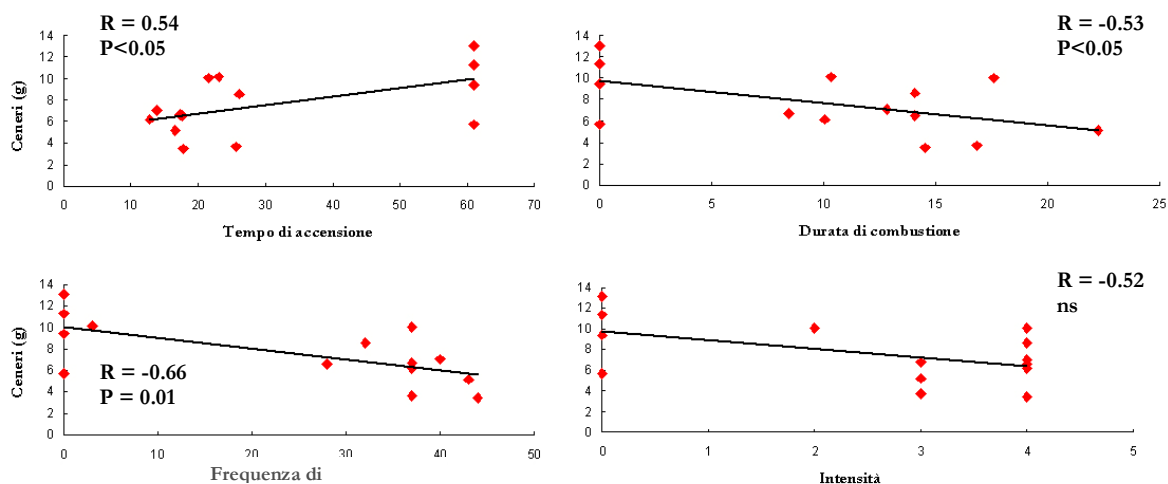


Fig. 5.2 – Correlazione tra i parametri di infiammabilità e il contenuto in ceneri della lettiera analizzata

5.3.2 - Degradazione termica della lettiera

L'analisi dell'andamento delle curve di degradazione termica (Fig. 5.3) ha permesso di distinguere tre fasi di evoluzione della combustione:

- una prima fase, compresa tra le temperature di 50 e almeno 210 °C (220 o 230 °C per alcune lettiere) di lenta degradazione, con una minima perdita di peso del campione;
- una seconda fase, compresa tra le temperature di 210 (220 o 230, per alcune lettiere) e 250 °C, in cui si assiste ad un salto cui corrisponde una elevata perdita di peso del campione;
- una terza fase, compresa tra i 250 e i 600 °C, di degradazione completa del campione, con andamento simile alla fase iniziale.

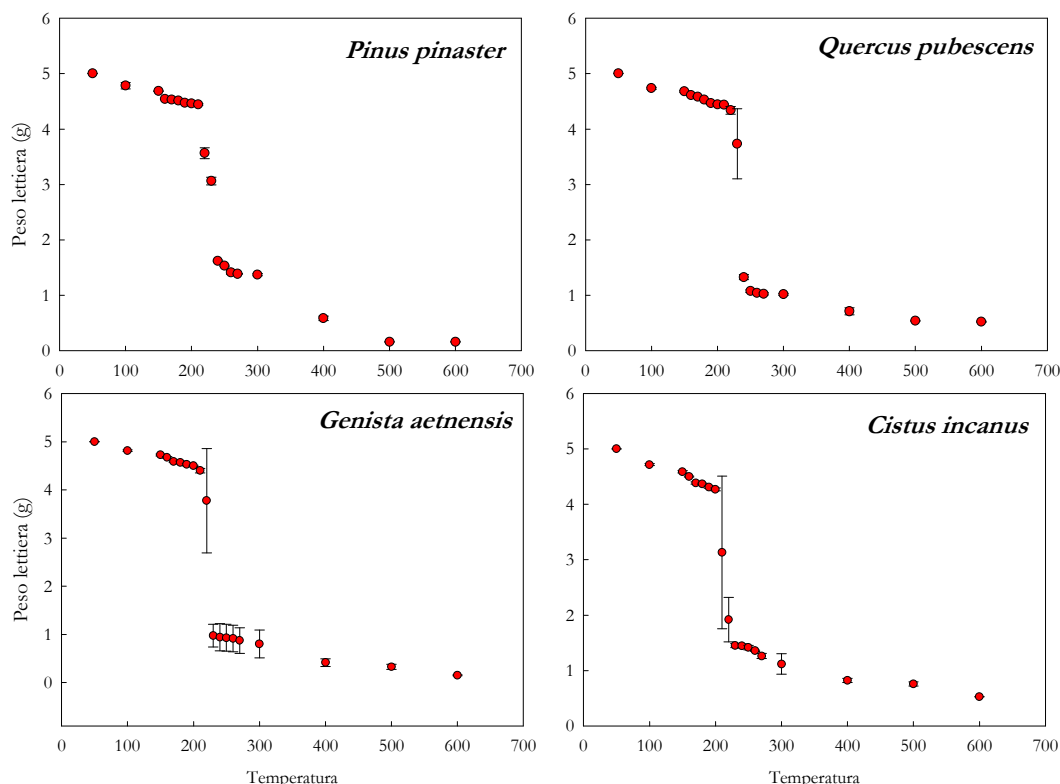


Fig. 5.3 – Degradazione termica della lettiera analizzata

In particolare, la prima temperatura cui si verifica una sensibile perdita di peso varia lievemente tra le diverse lettiere tra 210°C (*Quercus ilex*, *Olea eu. sylvestris*, *Ulmus minor*, *Robinia pseudoacacia*, *Pistacia lentiscus*, *Cistus incanus* e *Cistus salvifolius*), 220°C (*Pinus pinaster*, *Myrtus communis* e *Genista aetnensis*) e 230°C (*Cupressus sempervirens*, *Pinus halepensis*, *Quercus pubescens* e *Fraxinus ornus*). Pertanto non si è osservata una netta differenziazione tra lettiere di specie differenti; inoltre a lettiere che hanno mostrato valori di infiammabilità elevati non corrispondono temperature di accensione basse. Infatti dall'analisi della correlazione tra la prima temperatura cui si è verificata una marcata perdita di peso del campione e i parametri di infiammabilità (media del tempo di ignizione, media della durata di combustione, frequenza di ignizione e intensità della fiamma) sono emerse relazioni opposte rispetto alle attese (Tab. 5.1). In particolare, la temperatura di massima perdita di peso (T_c) è risultata inspiegabilmente correlata negativamente con la media del tempo di ignizione (MDI) e con il contenuto in ceneri e positivamente con la media della durata di combustione, la frequenza di ignizione e l'intensità della fiamma. Tale sorprendente risultato può essere giustificato dalla distruzione del campione, che è stato polverizzato per le misure, e suggerisce che l'anatomia fogliare, non conservata nel campione, può avere un'importanza rilevante sull'infiammabilità

della lettiera. Infatti studi condotti su materiale vegetale fresco (Zaghi et al., 2004) hanno dimostrato una correlazione tra infiammabilità delle foglie e compattezza del mesofillo. Tartaglini et al. (1992) invece hanno attribuito importanza alla dimensione della lamina fogliare: a foglie più larghe sarebbe associato un minore rischio di incendi.

Contrariamente alle attese l'esperimento di degradazione termica della lettiera non ha consentito di identificare la temperatura di accensione delle lettiere di diverse specie.

CAPITOLO 6

ANALISI MULTIVARIATA DEI DATI

6.1 - Premessa

La notevole quantità di dati ottenuta dalle analisi dell'infiammabilità della lettiera, del contenuto in ceneri e della degradazione termica, considerando l'alto numero di variabili in gioco, ha reso necessario la riorganizzazione di tali dati per validare le ipotesi espresse sulla differenza di infiammabilità tra lettiere di diverse specie e sull'influenza del contenuto in ceneri sull'infiammabilità. A questo scopo è stata effettuata un'analisi multivariata sui dati relativi alle lettiere studiate.

L'analisi multivariata è una tecnica statistica che permette la semplificazione strutturale in presenza di dati descritti da un elevato numero di variabili. Gli insiemi di dati sono ricondotti, in forme più semplici con cambi di variabili, in particolare, con trasformazioni capaci di sciogliere variabili connesse in variabili indipendenti (Wackerly et al., 2001). L'analisi dell'insieme di dati deve porre in evidenza la presenza di gruppi (clusters), ovvero di sottoinsiemi di oggetti, caratterizzati da valori preferenziali degli attributi o di parte di essi, cercando di ridurre le notevoli variabilità presenti; l'analisi degli insiemi di dati, inoltre, deve far ricadere, per quanto è possibile, differenti variabili in un unico gruppo (Wackerly et al., 2001). Tale discorso vale in particolare per variabili con dipendenza lineare o correlate.

Il confronto probabilistico fra statistiche campionarie e valori teorici di riferimento, permette di formulare un giudizio critico sui risultati ottenuti nelle varie tappe dell'analisi multivariata.

6.2 - Metodi di analisi

I dati ottenuti sono stati elaborati mediante Analisi delle Componenti Principali (PCA) e Cluster Analysis. L'Analisi delle Componenti Principali è stata utilizzata per studiare la relazione tra i parametri di infiammabilità (media del tempo di ignizione, media della durata di combustione, frequenza di ignizione e intensità della fiamma) e il contenuto in ceneri delle lettiere analizzate. Non è stato invece utilizzato il risultato ottenuto dalle analisi di degradazione termica della lettiera in quanto la temperatura di massima perdita di peso probabilmente non corrisponde alla temperatura di accensione.

La Cluster Analysis è stata utilizzata per classificare più chiaramente le lettiere sulla base dei differenti parametri di infiammabilità, utilizzati simultaneamente.

Il software utilizzato per le analisi è Syn-Tax 2000.

6.3 Risultati e discussione

Come è noto nel grafico che riporta i risultati dell'Analisi delle Componenti Principali (biplot, Fig. 6.1) la distanza dei punti sul piano è in ogni direzione inversamente proporzionale alla "similitudine" tra le variabili; in altre parole, le specie con parametri simili giacciono vicine sul piano, mentre quelle con parametri molto diversi giacciono lontane. Si può osservare che le lettiere di *Ulmus minor*, *Robinia pseudoacacia*, *Pistacia lentiscus* e *Cistus incanus*, che hanno mostrato un'inflammabilità nulla (cfr. par. 4.3), sono raggruppate nei quadranti di destra del biplot e sono distanti da tutte le altre lettiere; *Cistus salvifolius* è risultato separato da tutte le altre lettiere, che invece si sono collocate tutte insieme nei quadranti di sinistra del biplot. L'asse principale del biplot è risultato correlato positivamente al contenuto in ceneri ($r=...$, $n=...$, $P<...$), pertanto le lettiere collocate a destra sono le più ricche di ceneri.

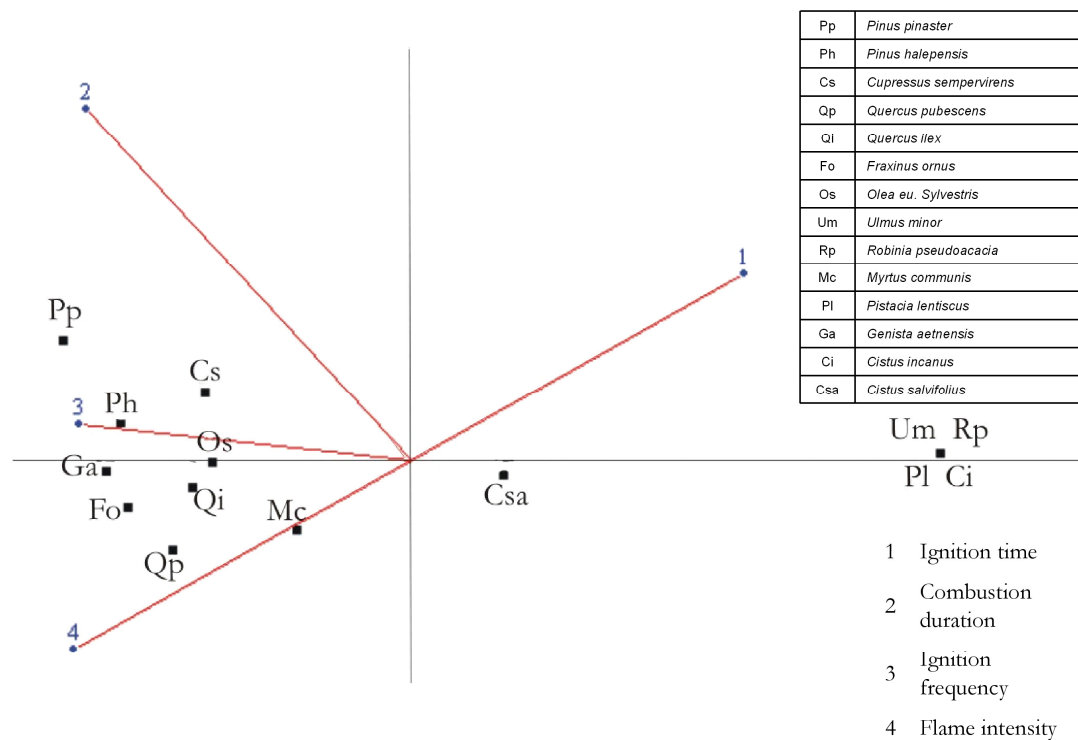


Fig. 6.1 Biplot relativo all'Analisi delle Componenti Principali effettuata utilizzando i parametri di inflammabilità della lettiera (1-4)

Il risultato della Cluster Analysis (Fig. 6.2) ha consentito di classificare le lettiere considerate in quattro classi a diversa infiammabilità: nulla (*R. pseudoacacia*, *U. minor*, *P. lentiscus*, *C. incanus*), bassa (*C. salvifolius*), media (*M. communis*, *O. sylvestris*, *Q. ilex*, *P. halepensis*, *C. sempervirens*) e alta (*P. pinaster*, *Q. pubescens*, *F. ornus*, *G. aetnensis*).

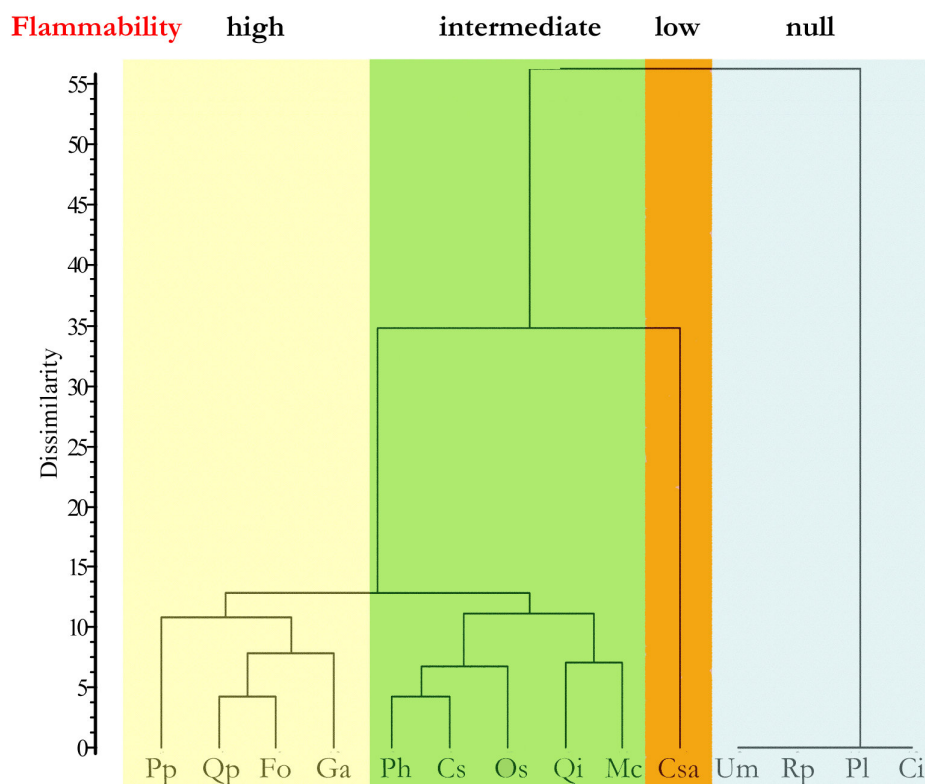


Fig. 6.2 Dendrogramma risultante dalla Cluster Analysis. (Pp: *Pinus Pinaster*; Qp: *Quercus pubescens*; Fo: *Fraxinus ornus*; Ga: *Genista aetnensis*; Ph: *Pinus halepensis*; Cs: *Cupressus sempervirens*; Os: *Olea eu. sylvestris*; Qi: *Quercus ilex*; Mc: *Myrtus communis*; Csa: *Cistus salvifolius*; Um: *Ulmus minor*; Rp: *Robinia pseudoacacia*; Pl: *Pistacia lentiscus*; Ci: *Cistus incanus*)

I risultati della PCA e della Cluster Analysis hanno consentito di interpretare più facilmente i dati ottenuti in questo studio. Analizzando simultaneamente i 4 parametri di infiammabilità è risultata più chiara la distinzione in classi di infiammabilità delle diverse lettiere considerate, in particolare con la Cluster Analysis (Fig. 6.2). Analizzando invece i parametri singolarmente (par. 4.3) sono apparse molto evidenti le differenze tra situazioni estreme, più complicata e a tratti soggettiva è risultata l'attribuzione a classi diverse di lettiere con caratteristiche intermedie. Inoltre, anche se l'analisi delle correlazioni lineari aveva già messo in evidenza l'effetto del contenuto in ceneri sui singoli parametri di infiammabilità, i risultati della

PCA hanno enfatizzato questa relazione mostrando una significativa correlazione tra questo parametro e l'asse principale del biplot.

CAPITOLO 7

RAPPRESENTAZIONE CARTOGRAFICA DEI DATI DI INFIAMMABILITA' DELLA LETTIERA

7.1 - Premessa

La valutazione di un indice di probabilità d'incendio può essere realizzata attraverso un sistema GIS (*Geographical Information System*), un potente mezzo d'analisi spaziale che permette di gestire un grande numero d'informazioni, di trattarle in modo simultaneo, realizzare alcuni calcoli automatici e restituire i risultati sotto forma cartografica.

Nel presente lavoro è stata svolta un'indagine su una porzione di area forestale al fine di realizzare carte tematiche relative all'infiammabilità della lettiera.

7.2 - Area di studio

La cartografia redatta si riferisce ad una porzione di territorio ricadente nell'area comunale di Maddaloni, in provincia di Caserta, e Cervino, in provincia di Benevento (Fig.7.1).

L'area investigata è una cenosi bosco-arbustiva con presenza di specie erbacee emicriptofitiche e evidenza di incendi avvenuti in passato. La formazione forestale a dominanza di *Quercus pubescens*, con individui anche di grosse dimensioni di *Ulmus minor*, *Myrtus communis* e sottobosco con *Smilax aspera* e *Rubia peregrina*, si alterna ad aree di macchia a dominanza di *Spartium junceum*, *Cistus incanus* e *Cistus salvifolius*, cenosi arbustiva strutturata ma di altezza ridotta con individui piuttosto giovani; localmente si trovano anche individui di *Pistacia terebinthus*.

Nelle aree di accumulo di umidità (impluvi, fossi) si ritrovano sporadiche presenze di *Ostrya carpinifolia* e *Fraxinus ornus*. Sono, inoltre, evidenti gli individui di *Olea europea* varietà *sylvestris* derivanti dalla morte per incendio o altro disturbo della porzione innestata e ricaccio del porta-innesto.

7.3 - Materiali e metodi

Il censimento delle specie arboree ed arbustive presenti nel territorio investigato, è stato effettuato nel periodo Agosto-Settembre 2006. Per ogni pianta sono state calcolate le coordinate geografiche tramite GPS (*Global Position System*) in modo da ottenere due layer informativi, uno riferito allo strato arboreo e uno riferito allo strato arbustivo, rappresentati come elementi puntuali.

Per ogni elemento è stata creata un'area *buffer* con diametro 2 m per le specie arboree e 1 m per le specie arbustive, che rappresenta la superficie di suolo occupata dalla lettiera; ad ogni specie censita è stato assegnato un valore di infiammabilità, il cui range va da 1 a 4 (4: infiammabilità alta; 3 infiammabilità intermedia; 2: infiammabilità bassa; 1: infiammabilità nulla) come risultato dall'analisi multivariata (cfr Fig. 6.2).

7.4 - Risultati

Come mostrato in Fig. 7.2, in generale l'area è caratterizzata da aree ad infiammabilità intermedia, poiché la specie predominante è *Olea eu sylvestris*; le aree a più alta infiammabilità risultano quelle in cui sono presenti anche individui di *Quercus pubescens* e *Myrtus communis* (Fig. 7.3); al contrario si nota la presenza di aree a bassa infiammabilità in presenza di specie arbustive quali *Pistacia lentiscus* e *Cistus salvifolius* (Fig. 7.4).

CAPITOLO 8

CONCLUSIONI

Finora non era mai stata analizzata l'infiammabilità della lettiera, pertanto questo studio ha fornito un primo contributo su tale problematica. Lo studio condotto ha consentito infatti di valutare l'infiammabilità della lettiera di diverse specie vegetali e classificarle in funzione di questa caratteristica, dopo aver standardizzato il metodo di analisi.

In particolare, nella prima fase del lavoro (Cap. 3), dedicata all'apprendimento della procedura per la determinazione dell'infiammabilità della biomassa, mediante 4 parametri di infiammabilità (media del tempo di ignizione, media della durata di combustione, frequenza di ignizione e intensità della fiamma), è stata anche applicata tale procedura a foglie di specie arboree e arbustive raccolte in formazioni forestali della Campania. I risultati hanno mostrato che generalmente l'infiammabilità è legata al tipo di pianta: tutti gli arbusti considerati hanno presentato una bassa infiammabilità, mentre le latifoglie sono risultate da infiammabili ad estremamente infiammabili, ad eccezione di *Robinia pseudoacacia* il cui test di infiammabilità è risultato negativo per tutte le prove effettuate. Le conifere hanno presentato una infiammabilità da bassa a moderata.

Nella seconda fase del lavoro (Cap. 4) è stata standardizzata la procedura per la determinazione dell'infiammabilità della lettiera. In particolare, attraverso prove eseguite sulla lettiera di foglie di una latifolia (*Quercus pubescens*) e sulla lettiera di aghi di una conifera (*Pinus pinaster*) a diverse temperature (200°C, 250°C, 275°C e 300°C), è stato stabilito che la temperatura ideale dell'epiradiatore per l'analisi dell'infiammabilità della lettiera è 250 °C, in quanto è la temperatura più bassa alla quale il materiale vegetale prende fuoco e permette, inoltre, di distinguere tra loro le lettiere di diverse specie, al contrario delle altre due temperature (275 e 300), che determinano una combustione troppo rapida del materiale vegetale (tempo di ignizione più basso). Da prove effettuate con diverso numero di repliche (25 e 50) è emerso che un maggior numero di repliche consente di differenziare meglio lettiere di specie diverse. E' stato inoltre definito un tempo di attesa di 2 minuti tra due prove successive per evitare l'innalzamento della temperatura dell'epiradiatore che riduce il tempo di ignizione e non consente di distinguere lettiere di specie diverse in base all'infiammabilità.

Dalle misure eseguite su lettiere di 14 specie, sia arbustive che arboree, è emersa una differenza di infiammabilità. In particolare le lettiere di *Quercus pubescens*, *Fraxinus ornus*, *Pinus pinaster* e *Genista aetnensis* sono risultate le più infiammabili tra le specie analizzate. D'altra parte, le lettiere di *Robinia pseudoacacia*, *Ulmus minor*, *Pistacia lentiscus* e *Cistus*

incanus hanno mostrato infiammabilità nulla. Le lettiera delle altre specie (*Pinus halepensis*, *Cupressus sempervirens*, *Myrtus communis*, *Olea eu. sylvestris*, *Quercus ilex*, *Cistus salvifolius*) hanno mostrato infiammabilità intermedia tra i due estremi.

Nella terza fase del lavoro (Cap. 5) è stato messo in evidenza che il contenuto in ceneri è un fattore importante nel determinare l'infiammabilità della lettiera, poiché specie con elevato contenuto di ceneri hanno presentato bassa infiammabilità. Al contrario, dalle analisi della degradazione termica, eseguite allo scopo di individuare la temperatura di accensione delle lettiera di diverse specie, non è emersa una relazione chiara tra la temperatura di massima perdita di peso della lettiera e i parametri di infiammabilità e inoltre le temperature di massima perdita di peso non differiscono tra le diverse lettiera considerate. Pertanto, contrariamente alle attese, tale temperatura non corrisponde alla temperatura di accensione delle lettiera. Probabilmente ciò è dovuto all'importanza che l'anatomia fogliare, non conservata nel campione, può avere sull'infiammabilità della lettiera.

Nella quarta fase del lavoro, nella quale i parametri che descrivono l'infiammabilità della lettiera sono stati analizzati simultaneamente mediante Analisi delle Componenti Principali (PCA) e Cluster Analysis (Cap. 6), è stato possibile classificare più chiaramente le lettiera considerate in quattro classi a diversa infiammabilità: nulla (*R. pseudoacacia*, *U. minor*, *P. lentiscus*, *C. incanus*), bassa (*C. salvifolius*), media (*M. communis*, *O. sylvestris*, *Q. ilex*, *P. halepensis*, *C. sempervirens*) e alta (*P. pinaster*, *Q. pubescens*, *F. ornus*, *G. aetnensis*). Questa classificazione è stata utilizzata per redigere carte tematiche delle zone a maggiore infiammabilità a partire da carte della vegetazione. Tali carte possono costituire uno strumento utile alla prevenzione del rischio incendi.

BIBLIOGRAFIA

- Allen S.E., 1989. Chemical analysis of ecological materials. Blackwell Scientific Publications.
- Andreae M.O. & Merlet P., 2001. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles* 15, 955-966
- Blasi C., Bovio G., Corona P., Marchetti M., Maturani A., 2004. Incendi e complessità ecosistemica. Dalla pianificazione forestale al recupero ambientale. Edizione a cura di Di Marzio P., Melekh A., Moretti G.
- Buresti E., Ciampelli E., Sulli M., 1976. *Indagini sugli incendi boschivi: previsione del rischio in base ai più comuni rilievi meteorologici e prove di combustione con lettiere e foglie di varie specie*. Annali dell'Istituto Sperimentale per la Selvicoltura di Arezzo, Vol VII, pp. 49-63
- Crutzen, P.J., Andreae, M.O., 1990. Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. *Science* 250, 1669-1678.
- D'Ascoli R., Rutigliano F.A., De Pascale R.A., Gentile A., Virzo De Santo A., 2005. Functional diversity of microbial community in Mediterranean maquis soils as affected by fires. *International Journal of Wildland Fire* 14: 355-363.
- Delabrazé P., Valette J.C., 1974. *Inflammabilité et combustibilité de la végétation forestière méditerranéenne* ; Rev. Forest. Fr. numéro spécial "Les incendies de forêts", 171-177.
- Dimitrakopoulos A.P., Papaioannou K.K., 2001. *Flammability assessment of Mediterranean forest fuels*. Fire Technology, 37, 143-152.
- Espirito-Santo M.D., Rego F., Costa J.C., 1993. Vegetation dynamics in the Serra dos Candeiros (Central Portugal). In: Trabaud L & Prodron R. (Eds.) Fire in Mediterranean Ecosystems. Ecosystems Research Report N.5, Commission of the European Communities, pp.29-46.
- Esposito A., Mazzoleni S., Strumia S., 1999. Post-fire bryophyte dynamics in Mediterranean vegetation. *Journal of Vegetation Science* 10: 261-268

- Faraco M.A., Fernandez F., Moreno J.M., 1993. Post-fire vegetation dynamics of pine woodlands and shrublands in the Sierra De Gredos, Spain. In: Trabaud L & Prodron R. (Eds.) *Fire in Mediterranean Ecosystems*. Ecosystems Research Report N.5, Commission of the European Communities, pp.101-112.
- Goldammer, J.G., Crutzen, P.J., 1993. Fire in the environment: Scientific rationale and summary of results of the Dahlem Workshop. In: Crutzen, P.J., Goldammer, J.G. (Eds.), *Fire in the Environment - The Ecological, Atmospheric and Climatic Importance of Vegetation Fires*. Wiley, Chichester, pp. 1 } 14.
- Jappiot M., Lampin C., Curt T., Borgniet L., Chandioux O., Taton T., Dumas E, Alexandrian D., D'Avezac H., Valette J.C., Moro C., Petriccione M., 2006. *Fire risk ignition: the integrated model "AIOLI"*; Proc. V Int. Conf. Forest Fire Research.
- Loomis, R. M., 1982. *Seasonal variations in ash content of some Michigan forest floor fuels*. Res. Note NC-279. St. Paul, MN: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station. 3 p.
- Mazzoleni S., 1993. Incendi e vegetazione mediterranea. In: Mazzoleni S., Aronne G. (Eds.) *Introduzione all'ecologia degli incendi*. Liguori Editore, pp. 43-72.
- Mendes Lopes J., Moro C., Valette J.C., Ventura J., 2001. *Fire Star behaviour model of wildland fire. Experimental values of basic parameters*; Rewiew report D5-01, EUFIRESTAR Project (www.eufirestar.org).
- Miles J., 1993. *Gli effetti del fuoco sulla vegetazione*. In Mazzoleni S., Aronne G. (Eds.), *Introduzione all'ecologia degli incendi*. Liguori Editore, Napoli, pp.13-27.
- Naveh Z., Dan J., 1973. *The human degradation of Mediterranean landscapes in Israel*. In Di Castri F., Mooney H.A. (Eds.), *Mediterranean Type Ecosystems: Origin and Structure*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 373-390.

- Núñez-Regueira L., Rodríguez Añón J.A. & Proupin Castiñeiras J. – 1996 – *Calorific values and flammability of forest species in Galicia. Coastal and hillside zones.* ; Bioresource Technology, 57, 283-289.
- Núñez-Regueira L., Rodríguez Añón J.A. & Proupin Castiñeiras J., 2004. *Using calorimetry for determining the risk indices to prevent and fight forest fires.* Thermochim. Acta 422, 81-87.
- Persiani, A.M., Maggi, O., Castelli, G., 2002. Biodiversity and composition of post-fire soil microfungal communities of a Mediterranean maquis (Southern Italy). In: Trabaud L., Prodon R. (Eds.), *Fire and Biological Processes*. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, pp. 163-171.
- Rothemel R.C., 1972. *A Mathematical Model For Predicting Fire Spread in Wildland Fuels*, USDA Forest Service Research Paper, INT-115, Ogden UT.
- Rutigliano F.A., D'Ascoli R., De Marco A., Virzo De Santo A., 2002. Soil microbial community as influenced by experimental fires of different intensities. In: Trabaud L., Prodon R. (Eds.), *Fire and Biological Processes*. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, pp. 137-149.
- Singh G., Kershaw A.P., Clark R., 1981. *Quaternary vegetation and fire history in Australian*. In Gill A.M., Groves R.H., Noble I.R. (Eds.) *Fire and Australian Biota*. Australian Academy of Science, Canberra, pp. 23-54.
- Talbot, R.W., Beecher, K.M., Harriss, R.C., Cofer III, W.R., 1988. Atmospheric geochemistry of formic and acetic acids at a mid-latitude temperate site. *Journal of Geophysical Research* 93, 1638-1652.
- Tartaglini N., Pezzetti E., Acosta A., 1992. Carta di rischio di incendio della vegetazione dell'isola di Gianntri. Un'aproposta metodologica. *Annali di Botanica* Vol. L, suppl. 9, Studi sul territorio, pp. 33-43.
- Trabaud L. & Lepar J., 1980. Diversity and stability in garrigue ecosystems after fire. *Vegetatio* 43: 49-57.

- Trabaud L., 1976. *Inflammabilité et combustibilité des principales espèces des garrigues de la Région Méditerranéenne*. Oecol. Plant., 11(2): 117-136.
- Valette J.C., 1990. *Inflammabilités des espèces forestières méditerranéennes*. Rev. Forest. Fr. 42, 76-92.
- Wackerly D., Mendenhall W., Scheaffer R., 2001. *Mathematical Statistics with Applications*, Duxbury Press.
- Yokelson R.J., Goode J.G., Ward D.E., Susott R.A., Babbitt R.E., Wade D.D., Bertschi I., Griffith D.W.T., Hao W.M., 1999. Emission of formaldehyde, acetic acid, methanol, and other trace gases from biomass fires in North Carolina measured by airborne Fourier transform infrared spectroscopy. *Journal of Geophysical Research* 104, 30109-30125
- Zaghi D., Massari G., Altamura M.M., 2004. *Infiammabilità di alcune specie mediterranee in relazione all'anatomia fogliare*; Biologi Italiani, 6, 42-47